

Joona Lehtonen

@450-verkko langattomassa M2M-käytössä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikka

Insinöörityö

13.5.2014

Tekijä(t) Otsikko	Joona Lehtonen @450-verkko langattomassa M2M-käytössä
Sivumäärä Aika	38 sivua + 2 liitettä
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoverkot ja tietoliikenne
Ohjaaja(t)	Toimitusjohtaja Matti Onnelainen Yliopettaja Tri Tero Nurminen
<p>Insinööriytyön tavoitteena oli tutustua CDMA-tekniikalla toimivaan @450-verkkoon ja selvittää sen soveltuvuutta langattomien M2M-sovellusten ja laitteiden käyttöön.</p> <p>Työssä keskityttiin @450-verkon käyttämään CDMA-tekniikkaan ja 450 MHz:n taajuusalueen tekniisiin ominaisuuksiin. Työn teoriaosassa taajuusalueen ja verkkotekniikan perusominaisuuksia tutkittiin ja verrattiin Suomessa muihin pääosin käytössä oleviin taajuusalueisiin ja verkkotekniikoihin. Taajuusalueen vaikutusta kuuluvuusalueen laajuuteen tutkittiin vertailemalla eri taajuusalueiden vaikutusta signaalin vaimenemiseen.</p> <p>Työssä varmistui ennalta oletettu käsitys @450-verkon laajasta peittoalueesta ja sen verkkotekniikan soveltuvuudesta liikkuvaan M2M-käyttöön, jossa tavoitettavuudella ja luotettavuudella on merkittävä osa. Laajan peittoalueen myötä @450-verkko osoittautui optimaaliseksi verkkoyhteydeksi harvaan asutetuilla alueilla. Tiheästi asutetuissa kaupunkiympäristöissä kapea taajuusalue ei välttämättä tarjoa laajaan kuluttajakäyttöön tarpeeksi kapasiteettia suurten solukokojen vuoksi, mutta matalan tiedonsiirtotarpeen M2M-sovellusten tarpeisiin se soveltuu hyvin.</p> <p>Työssä CDMA450-verkon toimintaa käytännössä testattiin yhden langattoman reitittimen avulla. Suomessa ainoana CDMA450-verkossa toimineen operaattorin Datame Oy:n kurssi insinööriytyön aloittamisen jälkeen rajoitti käytännön testauksen laajuutta. Etäyhteyden kautta suoritettu testaus Norjassa sijaitsevassa vastaavassa CDMA450-verkossa osoitti kaupunkiolosuhteiden haasteellisuuden. Conelin CDMA450-reititin osoittautui kuitenkin toimivaksi olosuhteista huolimatta ja pysyi tavoitettavissa kiitettävästi.</p> <p>CDMA450-verkon jatkuvuus tulevaisuudessa arvioitiin Suomessa olevan epätodennäköistä. 450 MHz:n taajuusalue tulee todennäköisesti tulevaisuudessa käyttöön LTE-verkkotekniikalla.</p>	
Avainsanat	@450-verkko, CDMA450, CDMA2000, M2M, LTE450

Author(s) Title	Joona Lehtonen @450-network in mobile M2M use
Number of Pages Date	38 pages + 2 appendices
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	Networking and Telecommunications
Instructor(s)	Matti Onnelainen, CEO Dr. Tero Nurminen, Principal Lecturer
<p>The objective of this thesis was to survey the @450 network using CDMA technology and to study its feasibility for mobile M2M applications and devices.</p> <p>The study focused on the technical features of CDMA technology and the 450 MHz frequency band. The basic characteristics of the frequency band and the network technology were examined and compared to other major frequency bands and network technologies used in Finland. The effect of the frequency band on the range of the coverage area was examined by comparing different frequency bands and their signal attenuation.</p> <p>The thesis confirmed the presumption that the @450 network has a large coverage area and that the network technology is suitable for mobile M2M use, where availability and reliability are key factors. The large coverage area of the @450 network proved to be optimal for network connection in sparsely populated areas. In densely populated urban areas, however, the narrow frequency band does not necessarily offer enough capacity for wide consumer use due to the large cell sizes. Nevertheless, for the low data demanding M2M applications, the network is well suited.</p> <p>The thesis also documents how the CDMA450 network was tested with a wireless router. As the only CDMA450 network operator in Finland, Datame Oy, went bankrupt during the thesis process, the extent of the practical test was limited. However, tests performed with remote access with a device working in a similar CDMA450 network in Norway demonstrated the challenges in city conditions. Furthermore, Conel's CDMA450 device, proved to be working fine and kept available despite the conditions.</p> <p>Continued usage of the CDMA450 network in the future was estimated to be unlikely in Finland. Instead, the 450 MHz frequency band is likely to be taken into use with LTE technology in the near future.</p>	
Keywords	@450-network, CDMA450, CDMA2000, M2M, LTE450

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Työn taustaa	2
3	Langattomien matkapuhelinverkkojen toimintaperiaatteet	3
3.1	Soluverkko	3
3.2	Mobiiliverkon elementit ja niiden tehtävät	3
3.3	Langattomat mobiiliverkkoteknologiat	6
4	Taajuusalueiden vertailua ja niiden ominaispiirteitä	8
4.1	Taajuusalueiden taustaa	8
4.2	Solun peittoalue	9
4.3	Vapaan tilan vaimennuksen malli	9
4.4	Taajuusalueiden vertailua solun koon suhteen	11
4.5	Peittoalueet Suomessa	14
4.6	Alhaisen käyttäjätiheyden maaseutu- ja korkean kapasiteetin kaupunkiympäristöt	15
4.7	Antennit	15
5	CDMA2000-mobiiliverkkoteknologia	17
5.1	CDMA-teknologian perusteet	18
5.2	CDMA2000 1x	22
5.3	1x EV-DO ja sen kehitysversiot	22
5.4	CDMA450	24
5.5	CDMA-verkon laitetunnisteet	25
5.6	Datayhteyden muodostus CDMA-verkossa	25
6	M2M	26
6.1	M2M-yhteydet	27
6.2	M2M-reitittimet	28
6.3	M2M-liittymät	30
6.4	CDMA450-verkon päätelaitteet	31
6.5	Laite- ja verkkotestaus	32
6.5.1	Testijakso Oslossa	32
6.5.2	Toinen testijakso	35
6.5.3	Testauksen päätelmiä	35

7	Tulevaisuuden näkymät	36
8	Johtopäätöksiä	37
	Lähteet	1
	Liitteet	
	Liite 1. Kuuluvuuskartat	
	Liite 2. LTE-downlink budjet	

Lyhenteet ja selitteet

@450	450 MHz:n taajuusalueella toimiva valtakunnallinen liikkuva laajakaista.
3GPP	<i>3G Partnership Program</i> . 3G-yhteistyöorganisaatio.
3GPP2	<i>3G Partnership Program 2</i> . Amerikkalainen vastine 3GPP:lle.
BTS	<i>Base Transceiver Station</i> . Tukiasema.
BSC	<i>Base Station Controller</i> . Tukiasemaohjain.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> . Radiotien kanavanvaraustekniikka.
CL PC	<i>Closed Loop Power Control</i> . Tehonsäätömenetelmä.
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM/Global evolution</i> . GSM-järjestelmän päivitetty datasiirtomenetelmä.
EV-DO	<i>Evolution Data Optimized</i> . Datakeskeinen cdma-tekniikka.
Flash-OFDM	<i>Fast Low-latency Access with Seamless Handoff</i> . Orthogonal Frequency Division Multiplexing. OFDMA-modulointiin perustuva teknologia.
GPRS	<i>General Packet Radio System</i> . Pakettikytkentäinen tiedonsiirtomenetelmä.
HLR	<i>Home Location Register</i> . Kotirekisteri.
HSPA+	<i>Evolved High-Speed Packet Access</i> . 3G-verkon päivitetty data-siirtomenetelmä.
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i> . Numerosarja GSM/UMTS-verkon käyttäjien yksilöintiin.
LTE	<i>Long term Evolution</i> . Edistynyt 3G-tekniikka.
M2M	<i>Machine to Machine</i> . Koneiden välinen tiedonsiirto.
MEID	<i>Mobile Equipment Identifier</i> . Globaali numerotunniste CDMA-verkon laitteissa.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> . Moniantennitekniikka.
MSC	<i>Mobile Switching Center</i> . Mobiilikeskus.
MSs	<i>Mobile Stations</i> . Liikkuva päätelaite esim. matkapuhelin.

NMT	<i>Nordic Mobile Telephone</i> . Ensimmäisen sukupolven matkapuhelintekniikka.
OL PC	<i>Open Loop Power Control</i> . Tehonsäätömenetelmä.
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> . 300-3000 MHz:n taajuusalue.
UMB	<i>Ultra Mobile Broadband</i> . Suunniteltu CDMA2000-päivitys.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> . 3G-toteutus.
VLR	<i>Visitor Location Register</i> . Vierailijarekisteri.
WDCMA	<i>Wideband CDMA</i> . Laajakaistainen CDMA.
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i> . Langaton lähiverkkotekniikka.

1 Johdanto

Työn tarkoituksena on selvittää, kuinka CDMA-tekniikalla toimiva 450 MHz:n @450-mobiiliverkko soveltuu langattomaan M2M-käyttöön tietopohjatasolla.

Työn taustalla on Datamen Digitalta ostama 450 MHz:n taajuudella toimiva langattoman tiedonsiirron verkko. Mobiiliverkko siirtyi Flash-OFDM -tekniikasta CDMA450-tekniikkaan ja on ollut toiminnassa loppuvuodesta 2012 alkaen.

CDMA450-tekniikka ja 450 MHz:n taajuusalue ovat tietopohjatasolla sopivia langattomaan M2M-käyttöön (Machine to Machine) eli koneiden väliseen tiedonsiirtoon. 450 MHz:n taajuusalueen etuna on erityisesti peittoalueen laajuus, joka sopii erityisesti liikkuvan kaluston tarpeisiin ja kohteisiin harvaan asutetuilla alueilla, joissa yhteys matkapuhelinverkon kautta on kuitenkin kriittistä. Datamen verkon peittoalueen sanotaankin kattavan 99.9 % Suomen väestöstä.

Työssä selvitetään tietopohjatasolla, kuinka CDMA450-verkko soveltuisi langattomaan M2M-käyttöön verrattuna nykyään pääosin käytössä olevan UMTS-verkon sijaan. Tulen selvittämään CDMA-tekniikan ominaisuuksien soveltuvuutta mobiiliin M2M-käyttöön. Tekniikan lisäksi M2M-käyttöön vaikuttavat asiat, kuten päätelaitteet ja liittymät, tulen osittain huomioimaan.

Suoritan CDMA450-verkossa pienimuotoisen käytännön testauksen yhden reitittimen ja tiedonsiirtoverkon osalta. Testissä tarkastellaan muunmuassa laitteen tavoitettavuutta, yhteyden viivettä ja pakettihäviötä, jotka antavat katsauksen verkon ja laitteen toimivuudesta sekä ominaisuuksista.

Työn aloituksen jälkeen yhdeksän kuukautta kestänyt huutokauppa 800 MHz:n taajuusalueesta saatiin viimein päätökseen. 800 MHz:n taajuusalueella toimiva 4G LTE -verkko tulee kasvattamaan LTE-verkon peittoaluetta merkittävästi, joten se kilpailee tulevaisuudessa asiakkaista myös harvaan asutetuilla alueilla.

Työn tekemisen aikana Datame ilmoitti menneensä konkurssiin, joten kyseisen yrityksen sekä @450-laajakaistan tulevaisuus on epäselvä Suomessa. CDMA450-verkon

tulevaisuudennäkymät arvioin olevan heikot ja uskon verkon tekniikan vaihtuvan todennäköisesti LTE-tekniikaksi tulevaisuudessa uuden operaattorin toimesta.

2 Työn taustaa

Insinööritö tehdään selvitystyönä Mobile World Communications Oy Ltd:lle. Mobile World Communications Oy Ltd on suomalainen langattomien reitittimien ja muiden koneiden väliseen langattomaan tiedonsiirtoon erikoistunut maahantuontiyritys, joka on toiminut vuodesta 1995 alkaen. Tuotevalikoimaan kuuluu useiden laitevalmistajien langattomat M2M-tuotteet vaativaan yritysviestintään; M2M- ja ajoneuvomodeemit, reitittimet sekä näiden oheistuotteet, kuten antennit ja kaapeloinnit sekä langattomat koti- ja yksityiskäyttöön tarkoitetut 2G-, 3G- ja 4G-tuotteet operaattoriverkkoon.

Työn taustalla on keväällä 2011 Datame Oy:n ostama @450-langaton laajakaistaliiketoiminta Digita Oy:ltä.

Digitan vuonna 2007 lanseeraama entinen NMT-verkko toteutettiin Flash OFDM-tekniikalla. Digitan verkkoa mainostettiin "Maamme laajakaistana", ja sen tavoitteena oli tarjota langaton laajakaistayhteys sinne, mihin valtakunnalliset ADSL- tai kaapelipalvelut eivät vielä yltäneet ja nostaa Suomen laajakaistapeite lähelle sataa prosenttia maan asukkaista.

Kesällä 2010 Digita ilmoitti, ettei se ole enää kiinnostunut jatkamaan @450-liiketoimintaa. 9. maaliskuuta 2011 @450-laajakaistaverkko myytiin Datame Oy:lle, josta tuli kaupan myötä @450-laajakaistaverkon uusi verkko-operaattori. [1.]

Keväällä 2012 tieto Qualcommilta verkkolaitteiden valmistuksen lopettamisesta sekä Valtioneuvoston hyväksymisen jälkeen Datame päätti aloittaa verkkotekniikan vaihtamisen CDMA-tekniikkaan. Toisin kuin Flash-OFDM -tekniikka, valittu CDMA-tekniikka on standardoitu tekniikkaa ja se on maailmanlaajuisessa käytössä. Valitulla CDMA-tekniikalla odotettiin olevan hyvät tulevaisuudennäkymät. Datame on myynyt @450-laajakaistaliittymää koko suomessa erityisesti syrjäseuduille kuluttajien tarpeisiin. [1.]

Sainkin tehtäväkseni selvittää 450 MHz:n taajuusalueella toimivan CDMA450-verkon sopivuutta langattomille M2M-laitteille ja niiden sovelluksille.

3 Langattomien matkapuhelinverkkojen toimintaperiaatteet

Mobiiliverkko on langattoman tiedonsiirtoyhteyden tarjoama verkko. Alun perin langattomat mobiiliverkot ovat tarjonneet lähinnä puhepalveluita, mutta myöhemmin ne ovat kehittyneet tarjoamaan mm. myös lyhytsanoma- ja datapalveluita.

3.1 Soluverkko

Mobiiliverkko on useimmiten jakautunut ns. soluihin, joissa tukiasema tarjoaa yhteyden lähellä oleville liikkuville laitteille. Useita pienempiä soluja käyttämällä voidaan luoda kattava maantieteellinen peittoalue sen sijaan että yksi suuritehoinen tukiasema vastaisi laajan alueen kattamisesta. Useiden pienempien solujen käyttämisestä saadaan verkolle myös mm. seuraavia huomattavia etuja [2.]:

- Verkon kapasiteetti kasvaa moninkertaiseksi jakamalla käyttäjämäärä monelle pienelle solulle.
- Tilaajalaitteet sekä tukiasemat kuluttavat vähemmän virtaa pienempien etäisyyksien ja lähetystehojen takia.
- Automaattinen yhteydensiirto solujen välillä mahdollistaa katkeamattomat puhelut ja tiedonsiirron palvelevan tukiaseman vaihtuessa.
- Automaattinen tilaajalaitteiden sijaintitietojen päivitys ja jatkuva yleiskanavan kuuntelu takaa puheluiden saapumisen tilaajalaitteisiin riippumatta sijainnista verkossa.
- Jatkuva signaalintason monitorointi tukiasemien välillä tunnistaa tarpeen palvelevan tukiaseman vaihtamiselle toiseen.

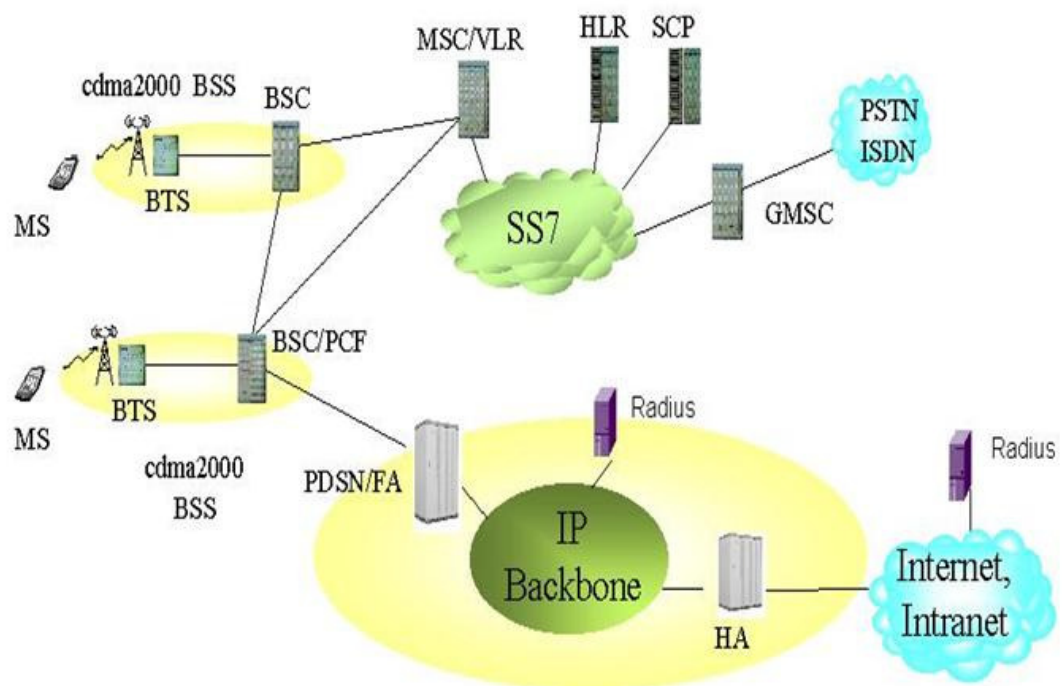
3.2 Mobiiliverkon elementit ja niiden tehtävät

Mobiiliverkkojen rakenteen vaihtelevat käytettävän verkkoteknologian mukaan, mutta pääpiirteittäin verkkojen pääelementit, kuten radioverkon tukiasemat ja niiden ohjaimet, runkoverkon matkapuhelinkeskus ja erilaiset rekisterit, sisältyvät kuitenkin toiminnoittain verkkojen rakenteisiin joillain tavoin. Kuvassa 1 nähdään esimerkki CDMA2000-tekniikalla toteutetusta verkosta ja sen elementeistä.

Tekniikan kehittyessä eri verkkoelementtien integroituminen ja arkkitehtuurin yksinkertaistaminen on ollut mielekästä. Täten verkon fyysinen arkkitehtuuri kehittyy jatkuvasti, mutta sen loogiset elementit ja tehtävät usein säilyvät ennallaan.

Mobiiliverkko koostuu tyypillisesti muunmuassa seuraavista elementeistä [2;3.]:

- päätelaitteet
- tukiasemat
- tukiasemaohjaimet
- vieras- ja kotirekisterit
- runkoverkon laitteet.



Kuva 1. Mobiiliverkon elementit [3].

MSs (Mobile Stations) eli tilaajalaitteet ovat verkon käyttäjien laitteita, jotka voivat vastaanottaa ja lähettää puheluita sekä dataliikennettä. Laitteiden ja liittymän tunnistetietojen avulla laitteilla on pääsy verkkoon, ja niiden avulla laitteiden sijaintia verkossa voidaan seurata palveluiden ylläpitämiseksi.

BTS (Base Transceiver Station) eli tukiasema vastaa radiosignaalien lähettämisestä ja vastaanottamisesta, muodostaen yhteyden radiojärjestelmän ja tilaajalaitteen välille sen hetkisessä solussa. Sen tehtäviä ovat mm. radiotien salaust, signaalitason mittaust, sanomien ajoitus sekä puheen ja datan transkoodaus.

BSC (Base Station Controller) eli tukiasemaohjain nimenmukaisesti ohjaa tukiaseman toimintoja. Kuten kuvasta 1 voidaan nähdä, se välittää tarvittavat tiedot eteenpäin verkon muille elementeille useinmiten kiinteiden verkkojen avulla. Tukiasemaohjain vastaa mm. seuraavista toiminnoista:

- yhteyksien muodostus ja katkaisu mobiililaitteiden ja tukiasemien välillä
- puheluiden ja datayhteyksien reititys
- mobiililaitteiden seuranta tukiaseman alueella
- lähetystehojen kontrollointi
- radioresurssien hallinta.

Tukiasema ja tukiasemaohjain muodostavat mobiiliverkon radioliityntäosan (Radio Access Network).

MSC (Mobile Service Switching Center) eli mobiilikeskus on kuvan 1 mukaisesti yhteydessä useisiin tukiasemaohjaimiin ja perinteisen puhelinkeskuksen tavoin mahdollistaa puheluiden ja muiden palveluiden yhdistämisen tilaajalaitteisiin. Mobiilikytkinkeskus on usein myös yhteydessä operaattorin runkoverkkoon ja täten myös Internetiin. Se on myös yhteydessä koti- ja vieraspaikkarekistereihin mobiililaitteiden asiakas- ja sijainti- sekä laskutustietojen välittämistä varten.

HLR (Home Location Register) eli kotirekisteri on tietokanta, joka hallinnoi tilaajaliittymiä ja niiden laitteita ja vastaa liittymätietojen talletuksesta ja hallinnasta. Se sisältää informaation tilaajalaitteen nykyisestä sijainnista verkossa mobiilikeskuksen tarkkudella sekä tilaajalaitteen tunnistetiedot, kuten MDN (Mobile Directory Number) ja IMSI (International Mobile subscriber identity). Todennuskeskus AuC (Authentication Center) on usein yhdistetty kotirekisteriin ja vastaa järjestelmän turvajärjestelyistä.

VLR (Visitor Location Register) eli vierailijarekisteri on dynaaminen tietokanta tilaajalaitteiden tarkkaa seuranta varten, ja se sisältää tarkat tiedot yhteyksien muodostamisesta tilaajalaitteisiin. Vierasrekisteri sisältää nimenmukaisesti tiedot kaikista tilaajalaitteista, jotka ovat tietyn mobiilikeskuksen alueella joiden avulla voidaan muodostaa yhteydet sekä tarjota tarvittavat palvelut laitteille. Se on sijoitettu usein mobiilikeskuksen yhteyteen.

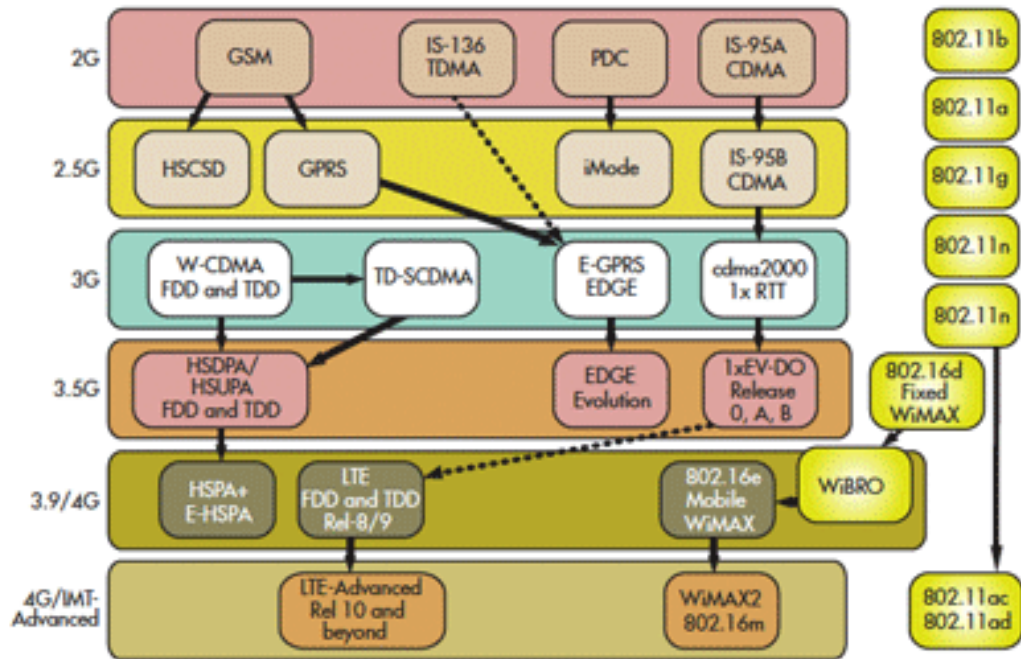
Mobiiliverkkojen runkoina toimivat nykypäivänä IP-pohjaiset runkoverkot. CDMA2000-verkossa PDSN/FA (Packet Data Serving Node/ Foreign Agent) toimii gateway-palvelimenä radioverkon ja pakettipohjaisen IP-verkon välillä. PDSN:n tehtäviä on muunmuassa käyttäjien PPP-yhteyksien hallinta (Point-to-Point Protocol), IP-osoitteiden jako, reititys ulkoverkkoihin ja datapalveluiden laskutustietojen keräys. [26.]

3.3 Langattomat mobiiliverkkoteknologiat

Mobiilidatan historia on jo yli kymmenen vuotta vanha, sillä ensimmäiset kaupalliset modernin mobiilidatan mahdollistavat verkot, kuten GPRS (General Packet Radio System) ja CDMA2000, kehittyivät toisen sukupolven järjestelmistä tarjoamaan pakettikytkentäisen datan piirikytkentäisen puheen rinnalle vuosituhaten vaihtuessa. Aikaisemmin käytössä ollut piirikytkentäinen datapalvelu ei enää riittänyt kasvaneeseen kysyntään. [4.]

Kuva 2 esittää matkapuhelinverkkojen kehitysvaiheita kohti neljättä sukupolvea, LTE:tä ja LTE-A:tä (LTE - Advanced). Eri mobiiliverkkoteknologioita ja niiden kehitysversioita on runsaasti.

Mobiiliverkkoteknologioiden kehitys on ollut rinnakkaista eri teknologioiden välillä, sillä historiallisista syistä eri maanosissa on ollut käytössä muunmuassa taajuusalueiden käytöstä johtuen eri järjestelmiä. Esimerkiksi Euroopassa on yleisesti ollut käytössä GSM-perheen ensimmäiset pakettikytkentäiset tiedonsiirtojärjestelmät, kuten GPRS ja EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution). Yhdysvallat, suurin osa Aasiaa sekä Afrikka on painottunut käyttämään CDMA-perhettä.



Kuva 2. Matkapuhelinverkkojen kehitys [5].

Tällä hetkellä suurin osa Suomea on katettu 900 MHz:n ja 2100 MHz:n taajuusalueilla käyttäen UMTS-verkkoa (Universal Mobile Telecommunications System) eli kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologialla. Tiheästi asutetut alueet, kuten kaupungit ja taajamat, on usein myös katettu ns. UMTS Dual Carrier (DC-HSPA+) -tekniikalla, jolla päästään jo lähelle 4G nopeuksia. UMTS-verkon rinnalla toimii 450 MHz:n taajuusalueella toimiva @450-verkko, joka myös kuuluu 3G-perheeseen.

4G-verkkojen levikki on vielä tähän asti rajoittunut kaupunkialueille johtuen sen käyttämisestä 1800 MHz:n ja 2600 MHz:n taajuusalueiden lyhyistä kantamista. 4G LTE -verkolla kuitenkin päästään jo teoriassa nopeusluokkaan 100 Mbit/s nykyisillä päätelaitteilla. Näiden 4G LTE -verkkojen peittoalue on kuitenkin kasvamassa nopeasti uuden 800 MHz:n taajuusalueen käyttöönoton myötä. Kolmen vuoden kuluessa jokainen taajuusalueen toimiluvan voittanut operaattori on lupautunut kasvattamaan 4G-verkkonsa väestöpeittoalueen noin 95 prosenttiin ja viiden vuoden kuluessa 97 tai 99 prosenttiin [17]. 800 MHz:n 4G-verkon latausnopeus on kuitenkin parhaimmillaan käyttäjien testien mukaan noin 30–50 Mbps:n luokkaa kapemmasta 10 MHz:n kaistanleveydestä johtuen, mutta tarjoaa huomattavaa parannusta käytettävyyteen mm. viiveen ja ylälinkin nopeuden osalta verrattuna 3G-verkkoihin. 1800:n ja 2600 MHz:n taajuusalueilla operaattoreilla on käytössä 20 MHz:n taajuuskaista LTE-verkolle.

4 Taajuusalueiden vertailua ja niiden ominaispiirteitä

4.1 Taajuusalueiden taustaa

Kaikki nykyisin Suomessa käytössä olevat mobiiliverkot käyttävät radiotaajuuskaistan UHF:n (Ultra high frequency) osaa signaalien lähettämiseen ja vastaanottoon. Tämä taajuusalue, 300–3000 MHz, on jaettu myös television, WiFi:n ja Bluetooth-lähetysten kesken. Historiallisista syistä taajuusalueet, jotka on allokoitu matkapuhelinverkkojen käyttöön, vaihtelevat hieman maanosien välillä.

Ensimmäisen sukupolven, pohjoismaissa käytössä ollut, NMT-verkko oli allokoitu 450 MHz:n taajuusalueelle. Vastaava 1G-teknologia Yhdysvalloissa, AMPS (Advanced Mobile Phone System) toimi 850 MHz:n taajuusalueella. Ensimmäisen sukupolven analogisten matkapuhelinverkkojen menestys osoitti tarpeen mobiilille viestinnälle.

Ensimmäisten sukupolvien pohjalta muunmuassa Euroopassa ja Yhdysvalloissa kehitettiin 1980-luvulla erilliset 2G-sukupolvet. Nämä uudet digitaaliset järjestelmät otettiin käyttöön 1990-luvun alussa, Suomessa ensimmäisenä vuonna 1991, entisen Radiolinjan toimesta. Euroopassa kehityksen tulos oli GSM (Global System for Mobile Communications), joka toimi 900 MHz:n alueella.

Yhdysvalloissa puolestaan verkot osittain päivitettiin D-AMPS:in (Digital-AMPS) samaa 850 MHz:n taajuusaluetta käyttäen, joskin taajuusaluetta hieman leventämällä molemmista suunnista kapasiteetin lisäämiseksi.

Tekniikan kehittyessä ja uusien mobiiliverkkosukupolvien myötä otettiin käyttöön uusia taajuusalueita vastaamaan kasvaneeseen kuluttajien kysyntään. Euroopassa mm. 1800:n, 2100:n ja 2600 MHz:n sekä Yhdysvalloissa 700:n, 1700:n ja 1900 MHz:n taajuusalueet ovat yleistyneet käytössä [33]. Radiotaajuusalueiden voidaan sanoa olevan rajoitettu luonnonvara, jonka käytöstä operaattorit voivat maksaa suuria summia. Jatkoksi nykyisiä 1800/2600 MHz:n 4G-verkkoja, Suomessa huutokaupatut 800 MHz:n taajuusalueen toimiluvat maksoivat operaattoreille yhteensä noin 108 miljoonaa euroa [17.].

Vanhojen tekniikoiden ja taajuusalueiden vapauttaminen on lähes ainoa tapa saada lisää kapasiteettia nykyisille matkapuhelinverkoille. Esimerkiksi viimeksi mainittu 800 MHz:n taajuusalue vapautettiin matkapuhelinkäyttöön mm. radiomikrofoneilta. Myös 700 MHz:n taajuusalue, joka on Suomessa tällä hetkellä lähinnä televisiokäytössä, on suunniteltu otettavan langattoman laajakaistan käyttöön tulevaisuudessa. [16.]

4.2 Solun peittoalue

Solun kuuluvuusaluetta voidaan ennustaa eri mallinnoilla suhteellisen tarkasti. Signaalien etenemismalleilla pyritään ennustamaan erilaisten osatekijöiden vaikutusta signaalin etenemiseen. Etenemismallit ovat operaattoreiden tärkeitä työkaluja radioverkkojen suunnittelussa. Etenemismallit pystyvät huomioimaan esimerkiksi maaston vaikutukset, kuten mäet, maaston tyypin, vesistöt, katuja, rakennukset jne. Tärkeimmät signaalin etenemiseen ja sen vastaanotettuun voimakkuuteen vaikuttavat tekijät ovat:

- vastaanottimen ja lähettimen etäisyys toisistaan
- lähettävän ja vastaanottavan antennin korkeudet
- taajuusalue
- lähetysteho
- ympäristötekijät.

Myös radioteknologioiden erot voivat vaikuttaa solun peittoalueeseen. Solujen koko saattaa esimerkiksi muuttua UMTS- ja CDMA-verkoissa käyttäjämäärän mukaan; suuri määrä käyttäjiä nostaa interferenssiä, jolloin solun koko pienenee. Nämä ovat ns. interferenssirajoitteisia verkkoja. LTE-verkkojen OFDMA-teknologia ei kärsi vastaanvanlaisesta ”soluhengityksestä”.

Tunnetuimmat mallinnukset signaalin etenemiselle ovat vapaan tilan vaimennuksen malli sekä Okumura-Hata.

4.3 Vapaan tilan vaimennuksen malli

Kuten aikaisemmin mainittu, useimmat radiojärjestelmät toimivat reilusti yli 100 MHz:n taajuusalueella, missä radioaallot kulkevat yksinkertaistettuna suoraan lähetimestä vastaanottimeen ns. näköyhteysetenemismenetelmällä. Vapaan tilan vaimennuksen malli olettaa näköyhteyden olevan olemassa ja radioympäristön olevan häiriötön.

Signaalin voimakkuus heikkenee etäisyyden kasvaessa, sillä radioaallon voimakkuus vähenee vapaassa vaimennuksessa radioaallon pallomaiseen hajontaan (spherical dispersion). Isotrooppisen antennin lähettämä teho jakautuu leviävän pallon pinnalle, ja sen säteilyteho pinta-ala yksikölle heikkenee pallon säteen neliönä, koska pallon pinta-ala kasvaa säteen neliön suhteessa. Tämä nähdään kaavassa 1, joka määrittää pallon pinta-alan. [2, s.141–142.]

$$A = 4 \pi r^2 \quad (1)$$

jossa A on pallon pinta-ala, ja r sen säde.

Vastaanottava antenni sieppaa sen läpi kulkevan tehon signaalista sen sieppauspinnan mukaan. Sieppauspinta on verrannollinen aallonpituuden neliöön, kuten kaavassa 2 voidaan osoittaa.

$$A_{isotr} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2)$$

jossa λ on radioaallon aallonpituus.

Sieppauspinnan ja siihen saapuvan tehon perusteella voidaan johtaa isotrooppiselle radioaallolle vapaan tilan vaimennus, joka esitetään kaavassa 3 tai kaavassa 4 desibelillä ilmoitettuna.

$$L = (4 \pi l / \lambda)^2 = (4 \pi f l / c)^2 \quad (3)$$

jossa L on vaimennus, λ radioaallon aallonpituus ja l lähettimen ja vastaanottimen etäisyys toisista, f signaalin taajuus ja c valonnopeus.

$$L \text{ (db)} = 20 \log_{10} (d) + 20 \log_{10} (f) + 32.44 \quad (4)$$

jossa d on lähettimen ja vastaanottimen etäisyys toisistaan kilometreissä ja f taajuus megahertseinä.

Kaavasta 4 nähdään myös, että vaimennus on kaksikymmenkertainen logaritmi taajuudesta ja etäisyydestä. Joten jos etäisyyttä tai taajuutta kaksinkertaistetaan, vaimennus kasvaa kuudella desibelillä (6 dB). Tämä tarkoittaa vastaanotetun tehon nelinkertaista heikkenemistä.

Käytännössä vapaan tilan vaimennuksen antamat tulokset eivät vastaa käytännön olosuhteita. Maaston luomat esteet, kuten kukkulat ja kasvisto tai ihmisen luomat rakennukset, aiheuttavat suurimmat vaimennukset signaalin etenemiselle. Ympäristön vaikutuksia ennustamaan on luotu useita mallinnuksia mobiiliverkkojen suunnitteluun. Radioaaltojen etenemistä ei voida kuitenkaan määritellä etukäteen, sillä se voi ympäristöstä johtuen kulkea useaa eri tietä mm. heijastusten, taittumisten ja taipumisten takia.

Myöskään lähettimet eivät usein ole isotrooppisia eli ympärisäteileviä, vaan ne ovat vahvennuksen kasvattamiseksi kavennettu sektoreiksi tai keiloiksi, joita yhdessä tukiasemassa on yleensä kolmesta kuuteen kappaletta.

Kuitenkin vapaan tilan vaimennuksen malli ja laskentakaava selvästi esittää käytettävän taajuusalueen merkityksen radioaallon vaimennukselle ja antaa teoreettiset rajat signaalin etenemiselle. [2, s.142–143.]

4.4 Taajuusalueiden vertailua solun koon suhteen

Keskityn työssäni vertailemaan Suomessa käytössä olevia taajuusalueita eli vertailemaan tietopohjatasolla 450 MHz:n taajuusaluetta pääasiassa 900 MHz:n ja 2100 MHz:n taajuusalueisiin, jotka ovat yleisimmät 3G-tekniikalla toimivat langattoman laajakaistan taajuusalueet. Myös 4G LTE -tekniikan jatkossa käyttämä 800 MHz:n ja nykyinen 1800 MHz:n taajuusalue otetaan mukaan vertailuun.

Käytössä olevan taajuuden vaikutus solukokoihin yleisesti osoittaa, että eri taajuusalueet käytännössä sopisivat paremmin eri käyttötarkoituksiin. Matalammat taajuusalueet, kuten 450 MHz sopisi hyvin harvaan asutetulle alueelle, kuten maaseudulle, ja GSM 900 (900 MHz) sopisi esim. haja-asutusalueille ja sitä korkeammat taajuudet kaupunkiympäristöön.

Taajuusalueella on myös vaikutusta signaalin läpäisykykyyn rakenteissa. Matalammalla taajuusalueella toimiva signaali läpäisee rakenteita paremmin pidemmän aallonpituutensa takia. Suomessa uusien rakennuksien moninkertaiset ikkunaelementit ja paksut seinärakenteet ovat aiheuttaneet asukkaille ongelmia heikompien signaalivoimakkuuksien takia sisätiloissa. Täten 450 MHz:n verkon kuuluvuus sisätiloissa voidaan olettaa

olevan parempi kuin korkeammilla taajuuksilla toimivien verkkojen. Tämä auttaa tilanteissa, joissa yhteyttä tarvitseva laite on rakennuksen sisällä eikä antennin asennus rakennuksen ulkopuolelle ole mahdollista. [35.]

Taajuuden kasvaessa solun koko käytännössä pienenee vaimennuksen kasvaessa samalla matkalla. Solun koon pienentyessä tarvitaan useampi tukiasema kattamaan vastaava peittoalue jolloin verkon kapasiteetti käytännössä kasvaa. Solujen koko ja verkon kapasiteetti on kompromissi, jonka operaattori päättää verkkoa suunnitellessa. Solun koko on harvoin kuitenkaan staattinen ja siihen vaikuttaa mm. verkon häiriöt kuten tilaajalaitteiden aiheuttama interferenssi eli varsinkin CDMA-pohjaisissa verkoissa ns. soluhengitys "cell breathing" sekä ympäristön esteet. Tilaajalaite onkin usein useamman solun alueella, joista yksi tai useampi sitä palvelee. Varsinkin uudemmat verkoteknologiat ovat hyödyntäneet useamman palvelevan tukiaseman ominaisuuden.

Lähetystehoja muuttamalla tai antennien suuntaamista alaspäin (down-tilt), operaattorit voivat muokata useita eri solukokoja eri ympäristöihin. Suuret makrosolut harvaan asutetulle alueelle ja pienemmät mikrosolut kaupunkialueille, joilla voidaan mitoittaa solun tarjoama tiedonsiirtokapasiteetti sopivalle määrälle käyttäjiä. Tiheästi asutetuilla alueilla verkko on yleensä mitoitettu kapasiteetin eikä mahdollisen peittoalueen mukaan.[35.]

Verkkoteknologialla on myös vaikutus solujen kokoihin, mutta pääasiassa solun kokoihin vaikuttaa käytössä oleva taajuusalue ja maaston laatu. Taulukosta 1 voidaan tarkastella laskennallisia CDMA2000-verkon solujen kokoja eri taajuusalueilla ilman maaston vaikutusta. Taulukossa oleva 450 MHz:n taajuusalue vastaa Datame Oy:n käytössä olevaa taajuusaluetta kyseisellä CDMA2000-verkolla. Tämä antaa vertailukohdaksi jopa lähes 50 kilometrin etäisyyden solun säteeksi teoreettisessa tilanteessa. Taajuusalueen kaksinkertaistaminen käytännössä merkitsee sitä että, 900 MHz:n taajuusalueella tarvittaisiin jo kolminkertainen määrä tukiasemia samalla verkkoteknologialla. Kyseiset laskennalliset arvot esittävät kuitenkin teoreettista tilannetta, jossa maaston vaikutuksia ei ole huomioitu ja jossa solun kuormitus on pieni. Käytännössä tilanne on kuitenkin eri signaalin etenemiseen vaikuttavien tekijöiden ja kuormituksen takia. Solun kuormituksen kasvaessa 50 prosenttiin on esitetty kasvattavan vaimennusta 3 dB, joka vastaa 20 % vähennystä solun säteessä. [19.]

Taulukko 1. CDMA2000-verkkojen solukoot [18].

Taajuus (MHz)	Solun säde (km)	Solun pinta-ala (km ²)	Suhteellinen Solumäärä
450	48,9	7521	1
850	29,4	2712	2,8
1800	14,0	618	12,2
2100	12,0	449	16,2
2500	10,0	312	24,1

Suoraa vertailua 800 MHz:n taajuusalueella toimivaan LTE-verkon peittoalueeseen ei voida pelkän taajuuden perusteella tehdä, mutta verkon alhaisessa kuormitustilassa voidaan arvioida CDMA-tekniikalla toimivalla @450-verkolla saavutettavan laajemman peittoalueen suhteessa samalla taajuudella toimivaan LTE-verkkoon, kun taas korkeassa kuormitustilassa peittoalue on pienempi. Linkkibudjettilaskelman esimerkki liitteessä 3 antaa LTE 800 -verkon säteeksi arvon 29,3 km kyseisillä parametreilla. Prabhat Man Sainjun Tampereen Yliopistolle vuonna 2012 tekemä diplomityö "LTE Performance Analysis on 800 and 1800 MHz Bands" esittää testissään suurimmaksi mitatuksi etäisyydeksi signaalin kuuluvuudessa tukiasemasta noin 30,2 km, joka vastaa laskelmia. Mittaukset oli suoritettu operaattorin testiympäristössä. [31.]

Kuten mainittu, LTE-verkoissa ei kuitenkaan tapahdu vastaavaa solun kutistumista rasiustilassa kuin CDMA-teknologioissa. LTE-tekniikalla on myös paremmat ominaisuudet signaalien monitie-etemisen hyväksikäytössä MIMO-tekniikalla, jolloin eroa kuuluvuusalueiden laajuuksilla käytännössä ei synny ratkaisevasti kumpaankaan suuntaan. Matalammilla taajuuksilla myös sanottu esimerkiksi LTE-verkossa olevan parempi toiminta solun reuna-alueilla. Korkeammalla taajuudella solun signaalintaso putoaa etäisyyden kasvaessa jyrkemmin, joten matalammalla taajuudella verkko voi olla vielä solun reuna-alueella paremmin tavoitettavissa, mikä edesauttaa kuuluvuusalueen laajuuteen. [31.]

Holman ja Toskalan kirjassa, WCDMA for UMTS, laskennalliset arvot 900 MHz:n verkolle antavat solun säteeksi arvon 27 km ulkokäytössä (rural outdoor) ja jopa 70 km kiinteästi asennetulle antennilla maaseutu ympäristöissä (rural fixed). Kaupunkiympäristössä solun kantama putoaa merkittävästi, ja kirjassa esitetyt arvot kantamasta ulkotilassa on 3,6 km (urban outdoor) ja sisätilassa 1,5 km (urban indoor). [30.]

Usein simuloidut mittaustulokset solun kantamassa on laskettu käyttäen erilaisia ympäristöolettamia. Urban-, suburban- ja rural-termeillä kuvataan maaston laatua laskujen parametrejä valitessa. Maaston laatu vaikuttaakin simuloiduissa tuloksissa jopa taajuusaluetta voimakkaammin solun peittoalueeseen. Kaupunkiympäristössä on harvoin tilanteita, joissa suora yhteys tukiaseman ja päätelaitteen välillä on olemassa, joka vaikuttaa peittoalueeseen.

Maapallon kaarava pinta rajoittaa kuitenkin suuria solujen kokoja käytännössä. Mikäli tukiaseman antenni on 80 metrin korkeudessa maanpinnasta, rajoittaa se solun säteen noin 40 km:n pituiseksi. Mitä laajempi solukoko siis halutaan, sitä korkeammalla tukiaseman antennien tulee olla. [29.]

4.5 Peittoalueet Suomessa

Nykyisin operaattorit useimmiten esittävät mobiiliverkkojensa peittoalueet julkisesti Internetissä, josta asiakkaat voivat tarkistaa kuuluvuuden tarvitsemassaan paikassa. Tämä data ei välttämättä ole aina päivitettyä tai tarkkaa, mutta kuitenkin suuntaa-antavaa tietoa. Operaattoreiden tukiasemien tarkat sijainnit ovat periaatteessa salaista tietoa. Myös esimerkiksi aikaisemmin mainittu seikka solukokojen muuttumisesta aktiivisten käyttäjien mukaan ei voida arvioida kartasta.

Vaikka peittoaluekartat osoittavat verkkojen suhteellisen hyvin kattavan varsinkin eteläisen Suomen, esiintyy katvealueita käytännössä harvaan asutuilla alueilla. Operaattori pyrkii kuitenkin kattamaan UMTS-verkossa esiintyvät katveet esimerkiksi hitaammalla EDGE-verkolla.

Liitteessä 1 esitetyt Datame Oy:n CDMA-verkon ja Elisa Oyj:n UMTS-verkon kuuluvuusalueet eivät suoraan ole verrattavissa toisiinsa, sillä Datame on verkollensa ilmoittanut myös lisäantennin avulla saatavan kuuluvuusalueen. Peittoalueet eivät kuitenkaan merkittävästi eroa Etelä-Suomen osalta, vaikka Elisalla esiintyykin paikka paikoin katvealueita myös siellä. Datamen katvealueita ilman lisäantennin käyttöä on vaikea arvioida kuuluvuuskartan avulla. Suurin ero kuuluvuusalueissa huomataan kuitenkin Oulun läänin ja Lapin läänin alueilla, joissa Datamen langattomalla laajakaistalla on selvästi enemmän peittävä kuuluvuusalue. Myös Keski-Suomessa Elisalla esiintyy runsaasti katvealueita UMTS-verkossaan. Näillä mainituilla alueilla Datame Oy:n verkon käytöllä voidaan saada parempi käyttäjäkokemus. Toinen alue, jossa Datamen verkolla

on kuuluvuuden suhteen etulyöntiasema, on merellä varsinkin rannikolta hieman kauemmaksi mentäessä.

Prosentuaalisesti Datame:n CDMA-verkon peittoalueella on ilmoitettu asuvan 99,9 % Suomen väestöstä. UMTS-verkoilla Suomen väestöpeitto on liikkunut 95 %:n tietämällä viime vuosina operaattoreiden arvioissa. Yritystoiminnan liikkua harvaanasutuilla alueilla tai maastossa, voidaan olettaa CDMA450-verkolla saatavan luotettavimmat yhteydet.

4.6 Alhaisen käyttäjätiheyden maaseutu- ja korkean kapasiteetin kaupunkiympäristöt

Jo mainitut seikat ovat kuvanneet CDMA450-verkon soveltuvuutta harvaan asutetuille alueille, sillä 450 MHz:n taajuusalueen avulla voidaan kustannustehokkaasti saavuttaa suuret solun peittoalueet tukiasemaa kohden, mikä on ideaalitapa kattaa alhaisen käyttäjätiheyden maaseutuympäristöt.

Verkon taajuus voi antaa mielikuvan, että se määrittää todellisen tukiaseman solun peittoalueen ja että korkeammilla taajuuksilla, esimerkiksi 1800 MHz:n taajuusalueella, toimivat verkot, olisivat parempia kaupunkiympäristössä. Käytännössä kuitenkin CDMA450-teknologia pystyy teoriassa tarjoamaan korkean kapasiteetin verkon kaupunkiympäristöön tehokkuutensa ja dynaamisesti kuormituksen vaikutuksesta pienentyvän solukoon takia. Myös CDMA-teknikan pehmeä tukiasemanvaihto on edukseen tilanteissa joissa usean tukiaseman peittoalueet asettuvat limittäin tuottaen voimakkaamman signaalin interferenssin sijaan. Teoriassa CDMA450-verkko sopisi näiltä osin koko maan peittäväksi tekniikaksi, mikäli käyttäjämäärät pysyisivät kohtuullisina tukiasemaa kohden. Yhden verkkoteknologian ja taajuusalueen käyttö voi helpottaa päätelaitteiston näkökulmasta, sekä operaattorin puolta yksinkertaisempaa taajuuslisensien hallintana. [19.]

4.7 Antennit

Antennilla on merkittävä vaikutus yhteyden kuuluvuuden kannalta. Suurin osa M2M-reitittimistä ja päätelaitteista on varustettuna ulkoisin antennipaikoin, jolloin antenni valitaan tarpeen mukaan. Liikkuvaan käyttöön, kuten ajoneuvoihin, valitaan usein ympärisäteilevä ja kompakti antenni, joka voi sisältää 3G- ja GPS-toiminnot samassa rakenteessa. Staattisissa asennuskohteissa voidaan valita kuuluvuusolosuhteiden mu-

kaan signaalia vahvistava, suuntaava antenni. Laadukas antenni vahvistaa signaalia usein noin 2–12dBi riippuen antennin mallista ja koosta, joten kuuluvuusalueeseen saadaan useita kilometrejä lisää. Ympärisäteilevän antennin vahvistus on pääsääntöisesti heikompi verrattuna suuntaavan antennin vahvistukseen. Suuntaava antenni vaatii kuitenkin esteettömän lähiympäristön toimiakseen virheettää, kun ympärisäteilevä antenni pystyy paremmin poimimaan esteistä heijastuvat signaalit. Voimakkaasti signaalia vahvistavan antennin kanssa voidaan käyttää myös pidempää kaapelointia, jolloin antenni saadaan asennettua parempaan paikkaan.

Antennin valinnassa tulee myös huomioida käytettävän taajuuden tuki. @450-verkkoa tukevat antennit eivät välttämättä tue korkeampia taajuuksia ja toisinpäin.

Antennien koko ja diversiteetti

Matalampia taajuuksia käyttäessä antennin koko on myös hieman suurempi, sillä antennin koon määrittää signaalin aallonpituus. Täten sekä tukiasema että päätelaitteen antennien koot ovat suurempia.

Matala taajuusalue voi myös vaikeuttaa vastaanottodiversiteetin käyttämistä. Käytännössä tilakäytön takia vastaanottimen tiladiversiteetin käyttö (Spatial Diversity) on joissain tapauksissa hankalaa sillä antennien on sijaittava vastaanottimessa toisistaan noin 40 cm ja tukiaseman päässä jopa yli 6,5 m [22]. Kuitenkin päätelaiteasennuksissa, joissa antennit voidaan kaapeloida erilleen toisistaan, tämä on mahdollista.

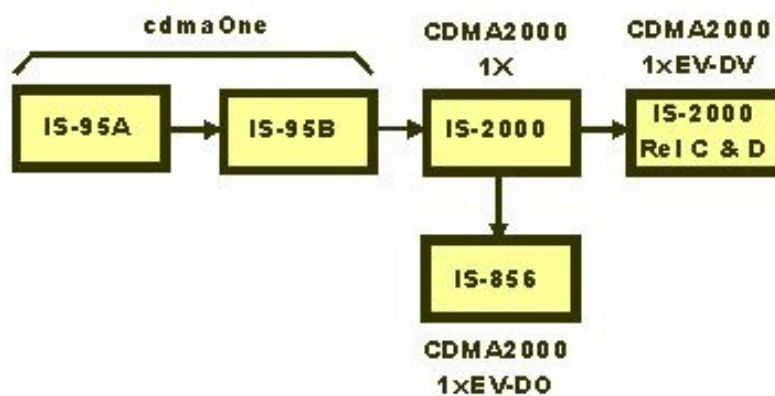
Toinen usein helpommin käytettävissä oleva diversiteetin tapa on ristipolarisaatio (Cross Polarization Diversity), jossa signaalit erotetaan toisistaan signaalin polarisatiota muuttamalla; toinen signaali on pysty- ja toinen vaakapolarisoitu, jolloin niiden keskenäinen häiriö pysyy minimissä. Ristipolarisaatioantennissa kaksi antennia on käytännössä yhdistetty yhdeksi, jolloin tilankäyttö pienenee. Ristipolarisaation voi myös muodostaa kahdesta erillisestä antennista asennettuna pysty- ja vaakasuoraan tukiasemaan nähden.

Kahta antennia käyttämällä saavutetaan monissa tapauksissa edut signaalin voimakkuudessa ja yhteyden luotettavuudessa, joten sitä on syytä käyttää mikäli mahdollista. CDMA2000 tukee sekä vastaanotto- että lähetysdiversiteettiä.

5 CDMA2000-mobiiliverkkoteknologia

Koska tämän insinöörityön tarkoituksena oli selvittää miten @450-verkko soveltuu langattomaan M2M-käyttöön, on sen verkkoteknologiana oleva CDMA2000 1x EV-DO (Evolution-Data Optimized) myös oleellinen osa työtä.

CDMA2000 perustuu sitä edeltäneeseen IS-95-standardiin (Interim Standard 95), joka oli ensimmäinen CDMA-perusteinen mobiilitekniikka. IS-95 oli Qualcommin kehittämä 2G-standardi, joka tunnettiin myös tuotenimellä cdmaOne. IS-95 oli laajasti käytössä mm. Yhdysvalloissa ja Kaudoidässä. IS-95:n etuja oli muunmuassa sen hyvä spektritehokkuus ja tuki suhteellisen monelle samanaikaiselle käyttäjälle. Kuvasta 3 nähdään CDMA-tekniikan versiot IS-95A, IS-95B ja IS-2000, jonka kehitysversiot ovat vielä laajassa käytössä maailmalla. [10.]



Kuva 3. CDMA-tekniikan kehitys [10].

CDMA2000-teknologia tarjoaa hyvät olosuhteet M2M-sovellusten tarpeisiin. Se on muunmuassa sanottu olevan [7.]:

- luotettava
- kustannustehokas
- tietoturvallinen
- kohtuulliset tiedonsiirtonopeudet tarjoava
- maailmanlaajuisesti käytössä
- energiatehokas

5.1 CDMA-teknologian perusteet

CDMA2000 käyttää kanavanvaraustekniikkaa, joka perustuu CDMA-teknologiaan eli koodinjakokanavointiin, mutta myös aikajakokanavointiin, jotta saadaan maksimoitua sekä yksittäisen käyttäjän että järjestelmän suoritusteho. Koodinjakokanavoinnissa koko taajuusalue on jaettu kaikille käyttäjille, jolloin käyttäjä voi saada koko saatavilla olevan kapasiteetin lähetykseen ja vastaanottoon. Eri käyttäjät erotetaan toisistaan koodauksen avulla, jolla käyttäjien signaalit moduloidaan. CDMA2000-teknologia jakaa UMTS-perheeseen kuuluvan WCDMA-teknologian kanssa useita samoja piirteitä saman kanavanvaraustekniikan takia. Tekniikan osalta WCDMA-teknologialla toimivat HSDPA- ja HSUPA-standardit ovat täten ominaisuuksiltaan lähellä CDMA2000-teknologiaa. Eri standardointiorganisaation takia (3GPP, 3G Partnership Project) WCDMA-teknologia lasketaan osaksi UMTS-perhettä. CDMA2000 1X standardin takana on puolestaan 3GPP2-yhteistyöryhmä. [9;8;20.]

Hajaspektritekniikka (Spread Spectrum) on tapa, jolla lähetettävä signaali levitetään käyttämään suurempaa taajuusaluetta kuin mitä se vaatisi tiedonsiirtoon. Tieto koodataan radiotaajuuteen parametreillä ja koodauksella, jotka ovat tiedossa vain tiedonsiirron osapuolilla. Hajaspektritekniikan etuja on muunmuassa tiedonsiirtonopeuden kasvattaminen ja suojaus sekä radiohäirinnältä että salakuuntelulta. Muita etuja ovat myös tekniikan hyvä kohina/interferenssi tehokkuus ja immuniteetti monitievaimennukselle. Tiedonsiirtokapasiteettin lisäys perustuu taajuuskaistan, signaali-kohinasuhteen ja tiedonsiirtokapasiteetin suhteeseen, jonka matemaatikko Claude Shannon esitti kuuluisassa kaavassaan (kaava 5) jo yli 50 vuotta sitten. [15.]

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (5),$$

missä C on kanavan kapasiteetti [bit/s], B kanavan kaistanleveys [Hz], S keskimääräinen signaalinteho [W] ja N keskimääräinen kohinan teho [W]

Tietoturvallisuus

Hajaspektritekniikan tuoman radiotien tietoturvallisuuden lisäksi CDMA tukee IPv4 ja IPv6 IPSEC protokollaperhettä, jonka avulla voidaan luoda salattu yhteys laitteiden

välille. Käyttäjillä on myös mahdollisuus VPN-verkkoihin (Virtual Private Network), joilla esim. M2M-dataliikenne voidaan erottaa normaalista käyttäjäliikenteestä. [28.]

Suorasekventointi

Hajaspektritekniikoita CDMA-käytössä ovat suorasekventointi (Direct Sequence Spread Spectrum) ja taajuushyppely (Frequency Hopping Spread Spectrum). Mobiileissa CDMA-järjestelmissä on yleisesti käytössä suorasekventointi. Suorasekvennoinnissa käyttäjien signaalit jaetaan laajemmalle taajuusalueelle käyttäen valesatunnaiskoodia muistuttavaa koodia (Pseudorandom Noise code) kantoaaltona. Hajautusprosessi laajentaa lähetettävän signaalin spektrin 1,25 MHz:n alueelle. Tällä tavoin hajautettu signaali ei häiritse muiden käyttäjien signaaleja, koska hajautetun signaalin voimakkuus jää alle taustakohinan voimakkuuden. [20.]

Suorasekvennoinnin lisäksi CDMA2000-järjestelmässä voidaan yhdistää kaksi tai kolme suorasekventoitua kantoaaltoa komposiittiseksi leveäkaistaiseksi CDMA-signaaliksi. [20.]

Monitie-eteneminen ja Rake-vastaanotin

CDMA2000-tekniikan etuja on monitie-etenemisen hyväksikäyttö. Tekniikka sallii signaalien kaappaamisen, jotka saapuvat vastaanottajaan eri aikaviiveillä monitie-etenemisestä johtuen. Niin sanotut haravavastaanottimet (rake receiver) keräävät sormillaan "Rake-fingers" kullakin ajanhetkellä joukon parhaita radorajapinnan komponentteja. Monitiesignaalikomponentit yhdistetään, jolloin signaalista saadaan voimakkaampi. GSM-tekniikassa puolestaan valitaan vain paras signaali ja hylätään muut. [20.]

Ortogonaalinen CDMA

CDMA-järjestelmissä kuten CDMA2000:ssa jokaiselle käyttäjälle tai koodikanavalle (code channel) annetaan uniikki ortogonaalinen koodi esim. Walsh-koodi downlink-kanavan koodaukseen. Ortogonalisuuden avulla saavutetaan hyvin pieni interferenssi usean samanaikaisen käyttäjän kesken. Tämä parantaa verkon kykyä palvella useita käyttäjiä. [20.]

Tehonsäätö

Hajaspektrijärjestelmien kuten CDMA2000:n ja WCDMA:n suurimpia ongelmia on ns. lähi-kauko-ongelma (near-far-problem). Ongelma johtuu useiden eri käyttäjien halutes-
sa kommunikoida eri etäisyyksiltä saman tukiaseman kanssa. Koska signaalit heik-
kenevät etäisyyden kasvaessa, kaukana olevien käyttäjien signaalin voimakkuus on
heikompi verrattuna lähellä olevien käyttäjien signaaleihin tukiaseman suhteen. Nämä
voimaakkaammat signaalit voivat hukuttaa tai estää heikomman signaalin sillä CDMA-
järjestelmässä kaikki osapuolet lähettävät signaalinsa samalla taajuusalueella. Toisaal-
ta kaukaiset käyttäjät tarvitsevat suuremman lähetystehon voidakseen kommunikoida
tukiaseman kanssa, mikä voi aiheuttaa häiriötä lähellä olevalle käyttäjälle. [20.]

Tehonsäädöllä voidaan säädellä eri käyttäjille nopeasti oikeat lähetystehot kuuluvuu-
den turvaamiseksi. Tehonsäädöllä on suuri vaikutus käyttäjien keskenäiseen interfe-
renssiin ja akkukeston parantamiseen mobiililaitteissa. [20.]

Tehonsäätöön päätelaitteissa vaikuttaa pääasiassa kaksi ominaisuutta [24.]:

- Open-Loop-tehonsäädössä (Open Loop Power Control) päätelaite suorittaa karkeaa tehonsäätöä tukiasemalta saapuvien signaalien perusteella. Mikäli saapuvan signaalin voimakkuus ylittää raja-arvon, matkapuhelin voi olettaa vaimennuksen ilmatiessä olevan pieni ja madaltaa lähetystehoa ja vastaavasti nostaa lähetystehoa kun tukiasemalta saapuva signaali on raja-arvoa heikompi.
- Closed-Loop-tehonsäädössä (Closed Loop Power Control) jossa tukiasema vertaa päätelaitteilta saapuvien signaalin voimakkuuksia ja lähettää komentoja päätelaitteille säätämään lähetysvoimakkuuksia halutulla tavalla.

Pehmeä tukiasemanvaihto

Katkeamattoman tiedonsiirron varmistamiseksi tilaajalaitteen liikkeessa ja palvelevan tukiaseman vaihtuessa tapahtuu CDMA-järjestelmissä ns. pehmeä tukiaseman-/kanavanvaihto (Soft Handoff). Tällöin päätelaite on yhteydessä useampaan tukiase-
maan useamman kanavan kautta. Yhteys vanhaan tukiasemaan katkaistaan vasta yhteyden muodostuttua uuteen (make-before-break). Mikäli tilaajalaite siirtyy saman tukiaseman kahden eri solun välillä, kyseessä on pehmeämpi tukiaseman-/kanavanvaihto (Softer Handoff). [20.]

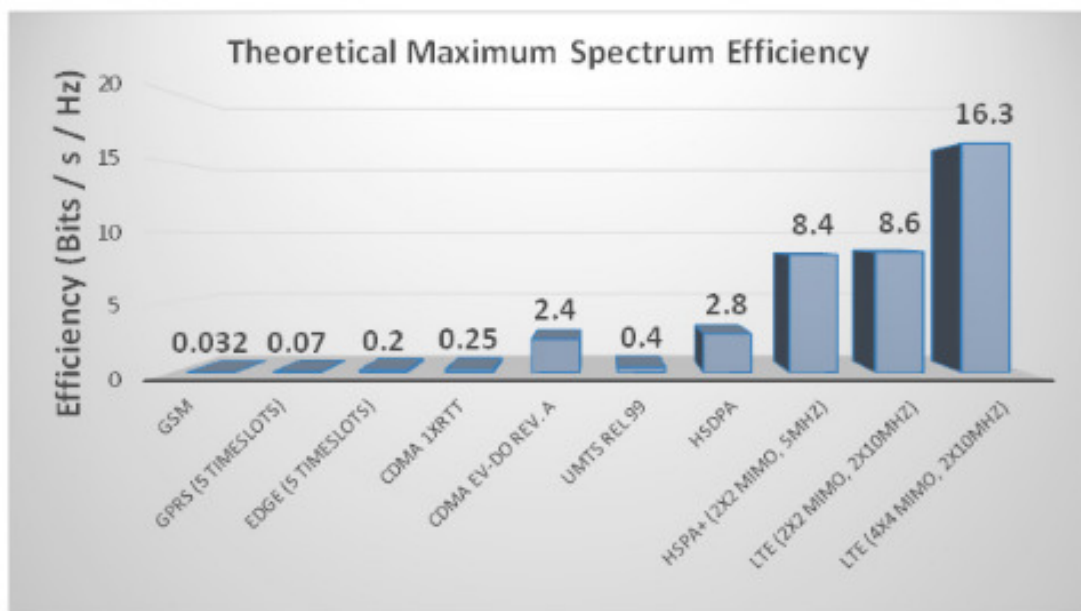
Yhden taajuuden käyttö verkon soluissa

CDMA-järjestelmissä totutusta poiketen verkon jokaisessa solussa käytetään samaa taajuutta, jolloin taajuuksien uudelleenkäyttökerroin on yksi ($N=1$). Yhden taajuuden käyttö parantaa verkon spektritehokkuutta ja kapasiteettia sekä helpottaa verkon suunnittelua. [20.]

Spektritehokkuus

CDMA-tekniikan (EV-DO) mainittu etu spektritehokkuuden suhteen on suhteellista. Vanhempiin radioteknologioihin, kuten UMTS:ään tai 2G-tekniikoihin, verrattuna etu on selvä. Kuitenkin uudet moniantennijärjestelmiä (MIMO) hyödyntävät tekniikat kuten, HSPA+ ja LTE, ovat selvästi jo parempia teoreettisen spektritehokkuuden suhteen, joka käy ilmi kuvasta 4. Tämä on kuitenkin oletuksena tilanteissa, joissa kahta antennia voidaan käyttää.

EV-DO versio Rev. B nostaa spektritehokkuutta vielä hieman kuvassa esitetystä Rev. A:sta.



Kuva 4. Verkkoteknologioiden teoreettisia spektritehokkuuksia [23].

5.2 CDMA2000 1x

CDMA2000 on joukko kolmannen sukupolven matkapuhelintekniikan standardeja, jotka käyttävät CDMA-yhteystekniikkaa puheen, datan ja signalointitietojen välittämiseen tilaajalaitteiden ja tukiasemien välillä. CDMA2000-perheen eri versiot kehitysjärjestyksessä ovat [7.]:

- CDMA2000 1xRTT
- CDMA2000 1xEV-DO: Release 0, Revision A, Revision B
- CDMA2000 1xEV-DO Revision C or Ultra Mobile Broadband (UMB)
- CDMA2000 1xEVDV.

CDMA2000 1xRTT on CDMA2000:n ydin. Merkintä 1xRTT (1 times Radio Transmission Technology) kuvaa järjestelmän käyttämää samaa 1,25 MHz:n taajuusaluetta kuten CDMA-teknologiaa edeltänyt IS-95. CDMA2000 1x RTT:sta kehitettiin markkinoiden tarpeeseen nopeampia datapalveluita tarjoava EV-DO-versio.

CDMA2000-tekniikan eri versiot ovat takaisinpäin yhteensopivia, joten uudempien kehitysvaiheiden, EV-DO Rev. A, EV-DO Rev. B ja CDMA2000 1x Rev. F, moduulit toimivat myös vanhemmissa verkoissa, kunhan 1,25 MHz:n taajuusalue toteutuu.

CDMA2000 1x Revision F

CDMA2000 1x:n radiopinnnan suunniteltu Revision F -päivitys sisältää uusia optimointeja muunmuassa M2M-sovelluksille. Rev. F parantaa CDMA2000-teknologian yhteydenmuodostusajkoja vähentämällä yhteydenmuodostuksen vaiheita vain yhteen vaiheeseen. Pienentämällä yhteydenmuodostukseen kuluva aikaa saadaan mittaussovelluksissa tai muissa akkukäyttöisissä sovelluksissa tehonkäyttöä pienennettyä. [28] Rev. F sisältää myös parannuksia radioverkon resurssien tehokkaampaan jakamiseen ja päivityksiä signalointiprotokollaan.

5.3 1x EV-DO ja sen kehitysversiot

CDMA2000 1x EV-DO:n ensimmäinen versio (Release 0) kehitettiin ja optimoitiin tarjoamaan datakeskeistä laajakaistapalvelua. Ensimmäiset kaupalliset verkot lanseerattiin vuonna 2002, jolloin se oli ensimmäinen mobiiliin laajakaistan tarjoama teknologia.

Release 0 hyödynsi olemassa olleen IP-protokollaperheen ominaisuudet ja siten tarjosi tuen IP-pohjaisille yhteyksille ja palveluille. Rel. 0 tukee latausnopeuksia 2,4 Mbit/s asti ja ylälinkin nopeus on 153 kbit/s yhdellä 1,25 MHz:n radiokanavalla. [7.]

1x EV-DO Revision A julkaistiin myöhemmin vuonna 2004. Se kasvatti verkon latausnopeuksia 3,1 Mbit:iin/s ja lähtevän liikenteen nopeuksia 1,8 Mbit:iin/s. Kasvanut lähtevän liikenteen nopeus mahdollisti suurempien tiedostojen ja datamäärien lähettämisen tilaajalaitteelta. Jatkuvasti toiminnassa oleva yhteys ja kohtuullisen pieni latenssi, jopa 50 ms, vastasi lähes käytössä olleita DSL (Digital Subscriber Line) yhteyksiä, joten muunmuassa VoIP-puhelut (Voice Over IP) ja videopuhelut olivat mahdollisia. EV-DO Rev. A:n ilmatien latenssispesifikaatioita ei julkistettu, mutta monet dokumentaatiot mainitsevat keskimääräisen latenssin olevan suhteellisen pieni, noin 100–140 ms tietämällä, joka on hieman vastaavia UMTS-verkkotekniikoita pienempi. [7.]

Seuraava versio, EV-DO Revision B vuonna 2006, kasvatti latausnopeutta lisää yhdellä kanavalla 4,9 Mbit/s:n. Se toi käyttäjälle myös tuen useamman siirtokanavan käyttämisen eli teoriassa kolmenkertaisen latausnopeuden (14,7 Mbit/s) kolmea kanavaa käytettäessä. Rev B hyödynsi myös tilastollista kanavointia, mikä edelleen pienensi latenssia. Laboratorio-olosuhteissa simuloidut mittaukset verkkoviiveestä ovat antaneet jopa 35 ms:n tuloksia Rev. B versiolla. Käytännön olosuhteissa voidaan kuitenkin päästä noin 50 ms:n luokkaan viiveessä, mikä on varsin hyvä tulos mobiiliverkolle. [7.]

EV-DO Revision C, toiselta nimeltä UMB (Ultra Mobile Network), olisi ollut seuraava suuri päivitys teknologiaperheessä vastaamaan ITU:n näkemystä seuraavan sukupolven mobiilipalveluista. Qualcomm kuitenkin on julkaissut lopettaneensa UMB:n kehitystyön ja keskittyvänsä LTE-tekniikkaan. [12.]

Revision C olisi tarjonnut monia LTE-verkoista tuttuja tekniikoita, kuten tuen MIMO-tekniikalle (Multiple-Input and Multiple-Output), jossa useampaa antennia käytetään sekä lähetykseen että vastaanottoon samanaikaisesti. MIMO-tekniikkaa hyödynnetään muunmuassa tiedonsiirtonopeuden kasvattamiseen ja parantamaan tiedonsiirron luotettavuutta. Revision C olisi mahdollisesti myös nostanut verkon latausnopeuksia maksimissaan 280 Mbit:iin/s ja lähtevän liikenteen nopeutta 68 Mbit:iin/s. Verkkolatenssi olisi pienentyt jopa 16,8 ms:iin ja spektrin joustava käyttöalue olisi laajentunut 20 MHz:n alueelle 1,25 MHz:n lohkoissa. Älykkäiden verkkojen käyttö kasvattaisi myös

verkon kapasiteettiä ja parantaisi käyttäjäkokemusta. Jotta CDMA2000-teknologia olisi pysynyt kilpailukykyisenä verrattuna uusiin LTE ja LTE-A verkkoihin, olisi Rev. C ollut merkittävä päivitys teknologian tulevaisuuden kannalta. [7, 11.]

EV-DO tarkoitti alun perin sanoja "Evolution-Data Only", mutta se muutettiin myöhemmin muotoon "Evolution - Data Optimized". Se ei kuitenkaan tukenut äänipuheluita verkossa. EV-DV-versio (Evolution - Data and Voice) tekniikasta tarjosi tuen myös puheille verkossa. [7.]

Nykyisin maailmassa on 314 eri CDMA2000-verkko-operaattoria, joista suurin osa (175) käyttää Revision A:ta. Release 0:lla on 112 ja Revision B:llä 12 operaattoria maailmanlaajuisesti. Suurin osa operaattoreista ja päätelaitteista toimii 800 MHz:n taajuusalueella, mutta myös Suomessa käytössä oleva 450 MHz:n taajuusalue on käytössä jossain määrin Pohjoismaissa ja Itä-Euroopassa. (115 operaattoria). [13.]

5.4 CDMA450

CDMA450 edustaa CDMA2000-teknologiaperhettä, joka toimii 410–470 MHz:n taajuusalueella. Tarkemmat taajuusalueet Suomessa ovat 453,700–456,925 MHz ja 463,700–466,925 MHz sekä 452,425–453,700 MHz ja 462,425–463,700 MHz. Taajuusalueet muodostavat käytännössä 2 x 1,25 MHz:n aluetta ala- ja ylälinkille. Suomessa verrattaen suppea taajuusalue, 2 x 1,25 MHz, asettaa fyysiset rajoitteet verkon kapasiteetille verrattuna esim. 1,25–20 MHz:n taajuusalueeseen joita LTE-verkoille voidaan joustavasti allokoida.

Suomen raja-alueilla on myös rajoituksia taajuusalueiden käytössä, mikä saattaa heikentää tiedonsiirtonopeuksia näillä alueilla.

CDMA450 on ollut ainoa standardoitu 3G-tekniikka, joka on kaupallisesti saatavilla käyttöön tälle taajuusalueelle. CDMA450-järjestelmät tukevat kaikkia 3GPP2:n kehittämiä CDMA2000-standardeja. Yhdistämällä 450 MHz:n taajuusalueen tuoman laajemman kantaman ja CDMA2000-teknologian edut muunmuassa spektritehokkuudessa ja laitteiston hinnassa tarjoavat hyvän arvolupauksen operaattoreille sekä asiakkaille. Suomessa toimineen Datame Oy:n @450-verkko toimi kyseisellä taajuusalueella. Operaattori lopetti toimintansa Joulukuussa, mutta osa verkkoa on yhä toiminnassa ja jatkaa toimintaa todennäköisesti uuden omistajan toimesta. [14.]

5.5 CDMA-verkon laitetunnisteet

Kuten mobiiliverkkojen laitteet yleensä, myös CDMA-verkoissa laitteet tarvitsevat laitetunnisteet. Vanhempi ESN- (Electronic Serial Number) ja uudempi MEID-tunniste (Mobile Equipment Identifier) ovat kaksi päätunnistetta, jotka ovat määritettynä laitteille. IMSI-numeroa (International Mobile Subscription Identity) käytetään tunnistamaan mobiililiittymän käyttäjät verkossa. CDMA EV-DO -laitteet eivät välttämättä käytä mobiiliverkoissa tuttuja SIM-kortteja (Subscriber Identity Module), vaan numero on usein suoraan konfiguroitu reitittimeen jo tehtaalla. CDMA-päätelaitteiden provisiointi operaattorin verkkoon saattaa hidastaa laitetoimituksia verrattuna UMTS-päätelaitteiden toimituksiin.

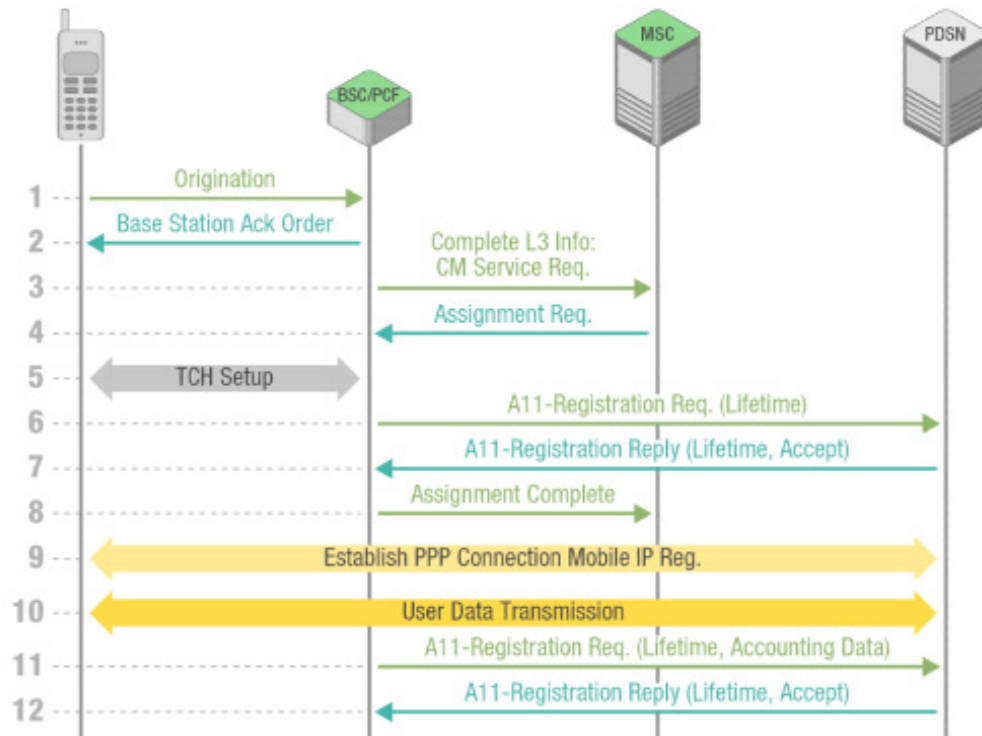
IMSI- ja MEID-tunnisteet tallennetaan CDMA-verkon AAA-palvelimelle (authentication, authorization and accounting), josta hallitaan verkkoon yhdistettyjä laitteita ja liittymiä.

5.6 Datayhteyden muodostus CDMA-verkossa

Jotta laite saa datapalvelut käyttöönsä on sen rekisteröityvä verkkoon. Se suorittaa rekisteröitymisen ensin sitä palvelevan langattoman verkon kanssa A1-liitännän kautta ja sen jälkeen pakettiverkkoon A10/11-liitännän kautta. Datayhteyden muodostus CDMA-verkossa tapahtuu kuvan 5 mukaisesti pääpiirteittäin seuraavissa vaiheissa [26.]:

1. Päätelaite lähettää Access-kanavalla Origination-viestin.
2. Tukiasema kuittaa saapuneen pyynnön.
3. Tukiasema muodostaa CM-palvelupyynnön ja lähettää sen mobiilikeskukseksi.
4. Mobiilikeskus lähettää tukiasema-alijärjestelmälle (Base Station Subsystem) pyynnön radioresurssien järjestelylle.
5. Tukiasema ja päätelaite suorittavat radioresurssien järjestelyt.
6. PFC lähettää A11-rekisteröintipyynnön valitulle PDSN:lle (Packet Data Serving Node).
7. PDSN hyväksyy pyynnön kuittaamalla viestin.
8. Tukiasema kuittaa CM-palvelupyynnön suoritetuksi.
9. Päätelaite ja PDSN muodostavat PPP-yhteyden ja muodostavat Mobile IP-rekisteröinnin.
10. MIP-rekisteröinnin jälkeen käyttäjä voi lähettää tai vastaanottaa dataa A10-yhteyden ylitse.

11. PFC säännöllisesti uusii A11-rekisteröintipyyntönsä ennen A10-yhteyden umpeutumista.
12. A11-rekisteröintipyyntöä kuitataan ja A10-yhteyden tiedot päivitetään.



Kuva 5. Datayhteyden muodostus [26].

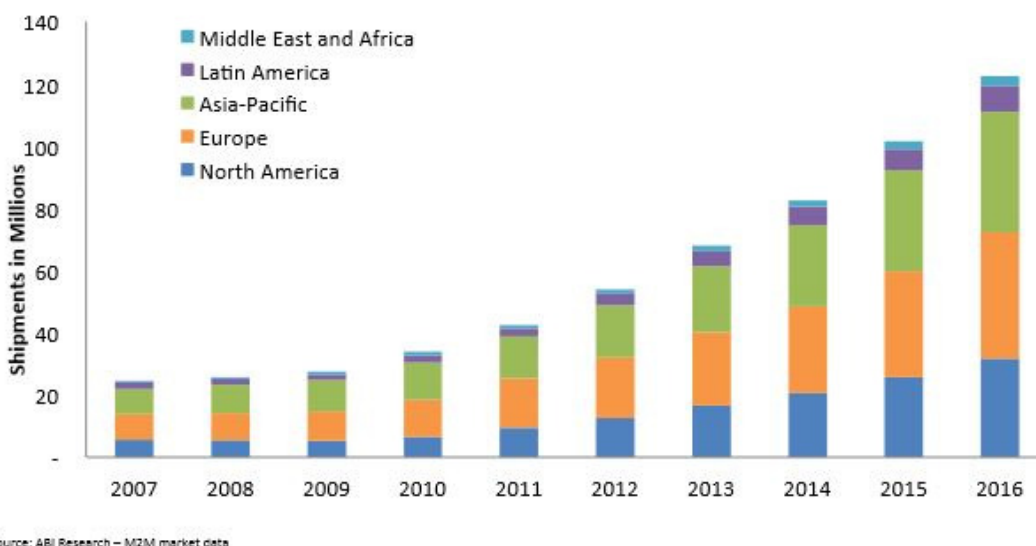
6 M2M

M2M eli "Machine to Machine" viittaa tekniikoihin, joilla joko langallisesti tai langattomasti järjestelmät tai laitteet voivat kommunikoida keskenään. M2M on sinänsä melko laaja käsite, eikä tiettyä yhteystekniikkaa tai viestintäteknologiaa ole määritetty. Tässä työssä pääpaino on langattomissa M2M-järjestelmissä, joissa yhteys järjestelmien ja laitteiden välillä on muodostettu langattomalla verkkotekniikalla, kuten CDMA450-tekniologialla. Tyypillisiä käyttäjiä ovat muunmuassa logistiikkayhtiöt, viranomaistahot, teollisuusautomaatio, telematiikka ja turva- ja vartiointipalveluita tarjoavat yritykset. M2M-laitteet esimerkiksi keräävät tietoa mittareista ja antureista, seuraavat ja raportoivat kuljetuskaluston sijaintia ja tapahtumia, valvovat erilaisia automaatiotekniikan prosesseja ja toimittavat tiedot eteenpäin järjestelmille, jotka muuttavat nämä tiedot merki-

tykselliseen muotoon esimerkiksi tiedoksi siitä, että jokin tuote on loppu juoma-automaatista tai mistä metsäteollisuuden harvesteri on puuta kaatanut. Erityisesti "Internet of things" eli asioiden Internet ja älykkäät sähköverkot kasvattavat eri M2M-sovellusten määrää lähitulevaisuudessa.

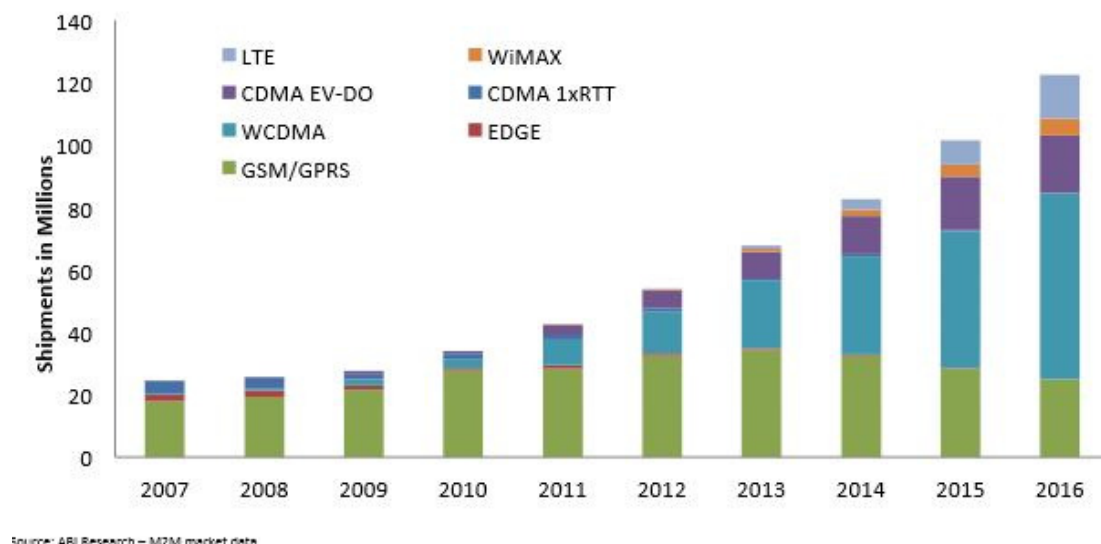
6.1 M2M-yhteydet

Verkkoon kytkettävien laitteiden määrä on kasvanut voimakkaasti viime vuosien aikana. "Internet of things" eli laitteiden Internet on tullut alan tapahtumissa esille yhä useammin. Määrä langattomasti kytketyille laitteille ja niiden verkkoyhteyden tarjoaville M2M-liittymille uskotaan kasvavan maailmanlaajuisesti vuosittain noin 24 % (kuva 6).



Kuva 6. Langattomien M2M-liittymien määrä maanosittain [20].

Suurin osa langattomista M2M-järjestelmistä on toteutettu maailmalla CDMA2000- ja GSM/GPRS-tekniikoilla alhaisen tiedonsiirtomäärätarpeen takia. Usein paikkatietoa tai muuta kevyttä tekstipohjaista dataa siirtävät M2M-laitteet eivät tarvitse suurta tiedonsiirtokapasiteettia. Tiedonsiirtomäärien kasvun ja vaativampien sovellusten, kuten videovalvonnan tai reaaliaikaisuuden, takia myös nopeammat 3G- ja 4G-yhteydet tulevat tarpeelliseksi. ABI Researchin tutkimuksen mukaan suuri osa järjestelmistä siirtyy 2G-tekniikasta 3G-tekniikkaan vuoden 2016 aikana (kuva 7) [20]. Tätä siirtymää tukee esimerkiksi Yhdysvaltojen suurimpiin operaattoreihin kuuluvan AT&T:n ilmoittama 2G-verkon alasajon ajankohta 31.12.2016. Laitteiden siirtymistä heti käyttämään 4G-tekniikkaa hidastaa vielä sekä laitteiden että mobiiliyhteyksien korkeahko hinta.



Kuva 7. Eri M2M-yhteystekniikat [20].

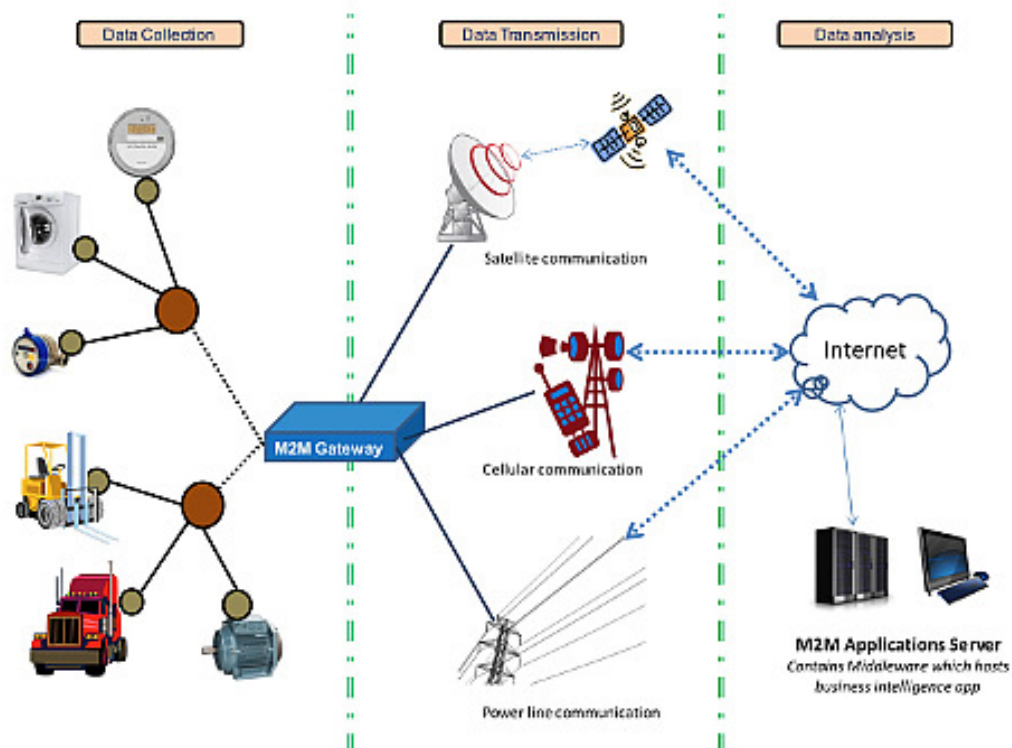
M2M-laitteiden elinkaarten ollessa useita vuosia kuluttajalaitteita pidempi muutosvauhti on melko maltillinen. 2G-tekniikan alasajo, taajuusalueiden vapauttamiseksi uudemmille tekniikoille (frequency refarm), on yksi alan huolenaihe suuren määrän 2G-tekniikalla toimivien laitteiden takia. Kaikkien 2G-tekniikalla toimivien laitteiden vaihtamisesta tulisi yrityksille suuria kustannuksia. Olisi syytä miettiä uusien laitetoimituksien jatkossa tukevan vähintään 3G-tekniikkaa. Toisaalta operaattorit tuskin haluavat menettää jo nykyisiä asiakkaitaan kovinkaan helposti. Operaattoreita ajaa uusien verkko-tekniologioiden pariin huomattavasti paremmat ominaisuudet. spektritehokkuudessa. [20.]

Myös käytettävällä verkkoteknologialla on vaikutusta M2M-laitteiden toimintaan. M2M-sovelluksia koskevat ongelmat ja tarpeet eroavat perinteisistä äänipuheluita tai älypuhelimia koskevista ongelmista. Kun kasvatamme riippuvuuttamme M2M-tekнологiaan ja liitämme kriittisiä yhteiskunnan elementtejä verkkoon, verkon suorituskyky, luotettavuus ja turvallisuus korostuvat.

6.2 M2M-reitittimet

M2M-reitittimen avulla voidaan tarjota M2M-laitteille luotettava yhteys ja etähallinta sekä muodostaa automaattisia varayhteysjärjestelmiä. Sovelluksia ja käyttökohteita, joihin ammattikäyttöön suunniteltuja varmatoimisia langattomia yhteyksiä tarjoavia laitteita tarvitaan, on lukuisia ja niiden määrä kasvaa jatkuvasti. Eri käyttökohteisiin reititimeltä luonnollisesti tarvitaan erilaisia ominaisuuksia.

Kuva 8 on esittä M2M-tekniikan keskeisten elementtien yhteydenpidon. M2M-reititin toimii siis niin sanottuna yhdyskäytävänä (gateway) tiedon siirtämiseen päätelaitteiden ja sovellusohjelmistojen välillä esimerkiksi mobiiliverkon ylitse. Muita yhteystapoja ovat satelliittilinkit ja sähkölinjat.



Kuva 8: M2M-reititin yhdyskäytävänä [38].

Yritys ja ammattikäyttöön suunnitellut langattoman verkon päätelaitteet eroavat kuluttajakäyttöön suunnitelluista laitteista yleensä rakenteeltaan ja monipuolisemmalla ohjelmistollaan. Rakenteeltaan laitteet ovat usein suunniteltu kestävämmän rankemmissakin olosuhteissa ja hyväksytty esimerkiksi ajoneuvokäyttöön. Myös kestävyysluokitukset, kuten IP-luokitus (Ingress Protection Rating), määrittelevät laitteen suojauksen pölylle ja kosteudelle. Ulkoiset antennipaikat kuuluvat oletuksena laitteisiin, jolloin olosuhteisiin ja käyttökohteeseen sopiva antenni saadaan asennettua haluttuun paikkaan. Monet reitittimet ovat usein myös muokattavissa asiakkaan tarpeiden mukaan erilaisilla optioilla. Reitittimeen voidaan esimerkiksi lisäkorttipaikoilla lisätä toimintoja, kuten langaton lähiverkko. Ulkoisesti samasta reitittimestä voi myös olla tarjolla eri radiomoduulivaihtoehtoja 2G-, 3G- ja LTE-verkkoihin ja niiden yhdistelmiä. Kriittisimmissä järjestelmissä voi reititin olla varusteltuna kahdella radiomoduulilla, jolloin mobiiliyhteys saadaan kahdennettua.

Ohjelmistolta laitteet eroavat varmemmalla toiminnallaan. Laitteet osaavat valvoa itse yhteyden tilaa, mikä varmistaa yhteyden päällä olon mahdollisimman hyvin, sillä langattomissa verkoissa ei voida taata yhteyksien katkeamatonta toimintaa. Yleisiä yhteyden tilaa valvovia hyödyllisiä toimintoja laitteissa ovat muunmuassa Ping-keepalive tai Network Watchdog. Keepalive-toiminto lähettää Ping-paketteja säännöllisesti haluttuun IP-osoitteeseen testatakseen yhteyden toimintaa, kun muuta liikennettä yhteydessä ei kulje. Mikäli Ping-paketteihin ei saada vastausta, laite suorittaa esimerkiksi yhteyden muodostuksen uudelleen. Mikäli laite ei saa yhteyttä muodostettua tietyn ajan kulussa, Network Watchdog voi suorittaa laitteen uudelleenkäynnistykseen. Laitteissa voidaan usein myös suorittaa itse lisättyjä skriptejä tai ohjelmistotyökaluilla tehtyjä pienimuotoisia ohjelmistoja omiin tarpeisiin.

Suurissa asennusmäärissä auttaa laitteiden etähallittavuus, konfiguraatietiedostojen käyttö ja erilaiset pilvipalvelut, joiden avulla esim. halutut asetustiedostot voidaan automaattisesti asentaa laitteisiin verkon ylitse.

Yhteys päätelaitteelta sitä tarvitsevaan laitteeseen tuodaan joko verkkokaapelilla tai langattomalla lähiverkolla.

6.3 M2M-liittymät

Laitteiden hankintaan vaikuttaa itse laitteiden hankintakustannusten lisäksi liittymien kustannukset merkittävästi. Operaattorit ovat tarjonneet yrityksille ns. M2M-liittymiä, joiden hinnoittelua voidaan optimoida tarvittavan dataliikenteen mukaan. M2M-reitittimille hankittaessa liittymiä on myös tarpeen huomioida julkisten sekä kiinteiden IP-osoitteiden saatavuus. Julkinen IP-osoite mahdollistaa reitittimen ja siihen kiinnitetyn laitteen etähallittavuuden Internetin ylitse, mikä on usein tarpeen. Kuluttajaliittymissä julkisten ja kiinteiden IP-osoitteiden saatavuus on nykyisin rajoitettu usein lisäpalveluiden alle.

Dataliikennemäärän pysyessä matalana liittymien kustannukset pysyvät maltillisina. Kustannukset ovat usein projektikohtaisia, jolloin suurelle määrälle laitteita saadaan alennettu hinta.

Verrattaessa Datamen CDMA450-liittymien hintoja Elisan ja Soneran UMTS-verkkojen M2M-liittymiin ennen verkon alasajoa, ei merkittäviä eroja kustannuksissa huomattu.

Yksittäisen 256 kbps CDMA450-liittymän kuukausihinta oli noin 5–10 €/kk, joka vastaa UMTS-verkon M2M-liittymän hintaa, joten suurta eroa ei liittymien kustannuksista synny yksittäisten laitteiden osalta. Liittymien määrän ollessa useita satoja hinnat perustuvat tarjouksiin ja eroja syntyy liittymien välillä. [34.]

6.4 CDMA450-verkon päätelaitteet

Vaikka CDMA450 perustuu laajasti käytössä olevaan CDMA2000-tekniikkaan, CDMA450-verkkoa tukevia päätelaitteita on suhteellisen pienen kysynnän vuoksi ollut rajoitettu määrä tarjolla markkinoilla viime vuosina. Rajoitetusta tarjonnasta huolimatta CDMA450-verkkoa tukevien laitteiden hinta on samaa luokkaa kuin vastaavien UMTS-reitittimien. Kuluttajille avoimia verkkoja on Suomen lisäksi käytössä lähinnä maissa, joissa entisiä NMT-verkkoja on ollut aikaisemmin käytössä, eli Pohjoismaiden lisäksi esimerkiksi Venäjällä, Latviassa ja Puolassa. Uusia verkkoja on rakennettu lähinnä kehittyvien markkinoiden alueilla kattamaan maantieteellisesti laajoja valtioita kustannustehokkaasti.

Päätelaitteen tärkeimpiä osia on radiomoduuli, joka vastaa radioyhteyden muodostamisesta päätelaitteen ja tukiaseman välille. Radiomoduuleja, jotka tukevat Suomessa toimivaa CDMA450-verkkoa, valmistavat tällä hetkellä ainakin Cellient ja Nexpring. Suomessa ollut Datamen CDMA450-verkko toimi EV-DO Rev. B -teknologialla, joten radiomoduulin on tuettava tätä verkkoteknologiaa. Päätelaitevalmistajat käyttävät kyseisiä moduuleita omissa laitteissaan. Mobile World Communications Oy on saanut edellisen vuoden aikana muutamia CDMA450-verkkoa tukevia langattomia reitittimiä testattavaksi. Reititinvalmistajat kuten NetModule, Virtual Access ja Robustel on toimittanut testattavaksi laitteita. Päätelaitteet ovat olleet lähinnä ammattikäyttöön tarkoitettuja ja langattomia reitittimiä. CDMA450-verkon päätelaitteiden käyttökohteita ovat muunmuassa tilanteet, joissa UMTS-verkoilla ei saavuteta tarpeeksi luotettavaa yhteyttä kuuluvuusongelmien takia. Datame Oy:n itse tarjoama kuluttajakäyttöön tarkoitettu Axestelin laite on myös käynyt kokeilussa. Datame Oy:n konkurssin myötä ja verkon alasajon myötä laitetestaukset jäivät melko pintapuolisiksi.

Verkon alasajon jälkeen sain kuitenkin etäyhteyden avulla testattavaksi Norjassa sijaitsevan yhteistyökumppanimme CDMA450-reitittimen. Laite on Conellin valmistama ammattikäyttöön suunniteltu CR10 v2 -reititin. Kyseisen laitteen avulla sain suoritettua pienimuotoisen laitetestauksen CDMA450-verkossa.

6.5 Laite- ja verkkotestaus

Norjan Oslossa sijaitsevan Conellin CDMA450 -reitittimen avulla suoritin mittauksia verkon tuotantoympäristössä. Täten verkon kuormituksesta ei ole tietoa, mutta kuvastaa verkon todennäköistä tilaa sen käyttöympäristössä. Yhteyshenkilön mukaan käyttäjämäärä Oslossa keskustan alueella kyseisellä verkolla on melko korkea, mikä saattaa vaikuttaa yhteyden suorituskykyyn. Operaattorin tukiasemaverkosto keskikaupunkialueella ei välttämättä ole tarpeeksi tiheä suuren käyttäjämäärän palvelemiseen. Tämä tuli esille testijakson aikana, jolloin yhteyden nopeus vaihteli 300–1200 kb/s:n alueella ja pakettihäviötä saattoi esiintyä päiväsaikaan. Datansiirtonopeutta ei testin aikana varsinaisesti seurattu yhteyden nopeuden ollessa rajattu.

Yhteystekniikka Norjassa toimivan ice.netin verkossa on sama kuin Suomessa toimineen Datame Oy:n verkossa, eli CDMA450 EV-DO Rev B. Suoritin mittauksia laitteen tavoitettavuudesta, yhteyden viiveestä ja signaalitasosta. Nämä tiedot antavat yleiskuvan verkon ja laitteen luotettavuudesta. Laitteen sisäisen tilastoinnin lisäksi asensin Conellin tarjoaman R-SeeNet-monitorointiohjelman, jonka avulla seurasin reitittimen toimintaa ja sen tilaa. R-SeeNet ohjelma käyttää hyväkseen SNMP:tä (Simple Network Management Protocol) laitetietojen keräämiseen. Ohjelmistoon määritellään tarkasteltava laite ja tarkastusaikojen tiheys. Testijaksolla ohjelmisto oli asetettu tarkkailemaan laitetta kolmen minuutin välein.

Etäisyys reitittimeen aiheuttaa ilmeisiä virhelähteitä ohjelmistolla mitatuissa arvoissa. Pakettihäviöön saattaa esimerkiksi vaikuttaa myös julkinen verkkoyhteys Suomesta Norjaan.

6.5.1 Testijakso Oslossa

Noin kaksi viikkoa kestäneen seurannan jälkeen voin todeta laitteen pysyneen tavoitettavissa melko hyvin. Laitteesta löytyvän sisäisen tilastoinnin mukaan laite pysyi verkossa noin 99,5 %:n ajan, mikä on kohtuullisen hyvä tulos mobiiliverkkoa käyttävälle laitteelle. Parhaimmillaan yhteydessä tapahtui päivän aikana vain yksi yhteyden uudelleenkäynnistys, joten yhteyttä ylläpitävä toiminnallisuus osoittautui toimivaksi.

Taulukko 2 esittää yhteyden signaalivoimakkuudet ja laitteen saatavuuden.

Taulukko 2. Laitteen saatavuus ja signaalinvoimakkuudet.

	Today	Yesterday	This Week	Last Week	This Period
Signal Min	: -117 dBm	-117 dBm	-118 dBm	-118 dBm	-118 dBm
Signal Avg	: -67 dBm	-68 dBm	-73 dBm	-72 dBm	-72 dBm
Signal Max	: -51 dBm	-61 dBm	-51 dBm	-15 dBm	-15 dBm
Availability	: 99.7%	99.9%	99.4%	98.9%	97.7%

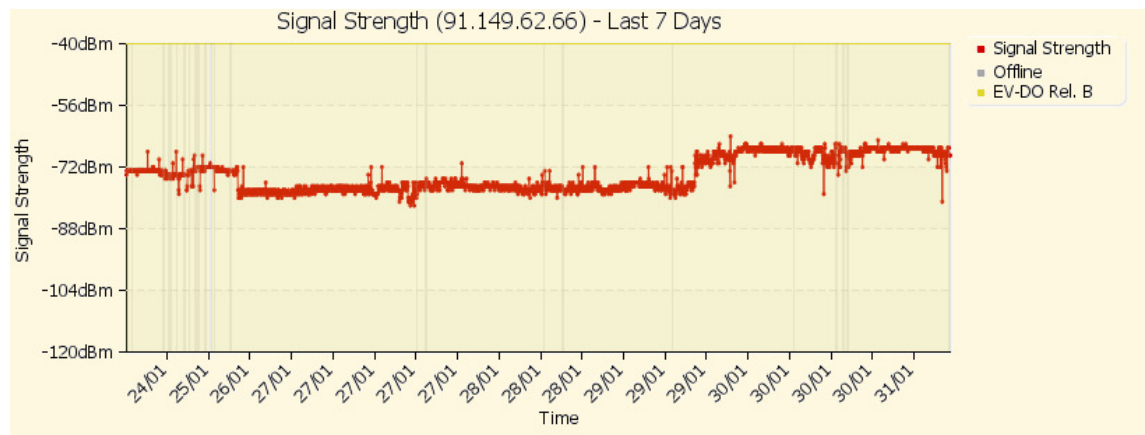
Laitteen ja verkon toiminnan muodostama hyvä saatavuus (availability) on yksi tärkeimmistä asioista M2M-järjestelmien kannalta.

Verkon ruuhkaisuutta Oslon keskustan alueella ilmensi päiväsaikaan esiintynyt pakettihäviö. Pahimmillaan päiväsaikaan saattoi hetkellisesti esiintyä jopa 60 %:n pakettihäviötä. Kuvassa 9 esimerkki kuvaajasta, jossa päivän ajalta mitattu pakettihäviö esitettyä ajan funktiona Oslon keskustassa. Tämä tukee väitettä, että kyseinen CDMA450-verkko ei ole parhaimmillaan tiheästi asutetulla alueella, mikäli operaattori ei ole panostanut tarpeeksi tukiasemaverkoston tiheyteen laajemman peittoalueen takia. Pakettihäviö huonontaa palvelun luotettavuutta ja käyttäjäkokemusta. Keskimääräinen pakettihäviö viikon ajalta oli noin 10 %:n luokkaa. Pakettihäviön syy ei varsinaisesti todentunut testin aikana, mutta oletama verkon ruuhkaisuudesta tukee pakettihäviön pienentymisestä aina yöaikana.



Kuva 9. Pakettihäviön esiintyminen.

Signaalitaso pysytteli hyvänä mittausjakson aikana. Keskimääräinen laitteen ilmoittama signaalinvoimakkuus oli -74 dBm, minimi oli -82 dBm ja maksimi -64 dBm. Alle -80 dBm:n arvoja signaalinvoimakkuudessa voidaan pitää riittävän hyvinä. Signaalinvoimakkuuden vaihtelu on esitettyä kuvassa 10. Signaalinvoimakkuus pysyi suhteellisen vakaana mittauslaitteen ollessa maantieteellisesti paikallaan seurannan ajan.



Kuva 10. Signaalinvoimakkuus viikon ajalta.

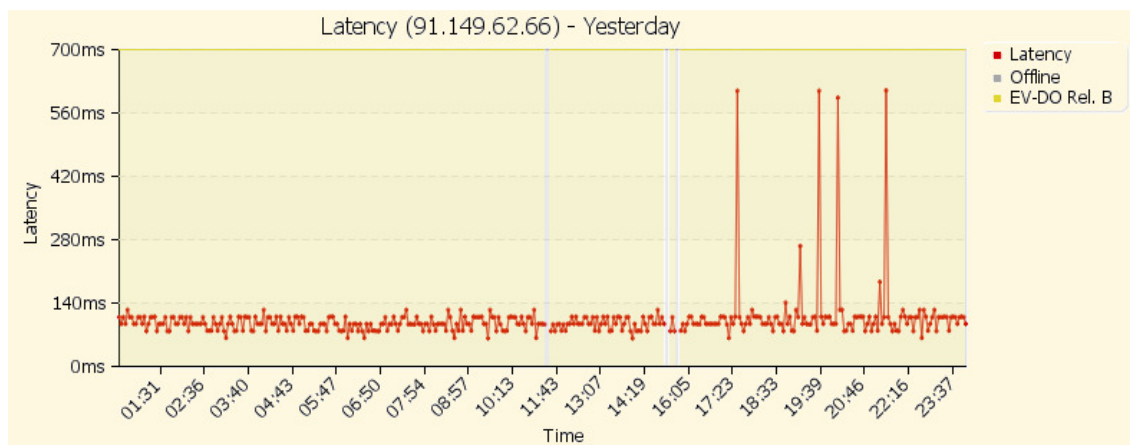
Suomesta mitattuna laite vastasi kyselyihin keskimäärin 110 ms:n viiveellä. Monitorointiohjelmalla mitatussa viiveessä tulee huomioida verkkoviive Suomen ja Norjan välillä, joka on noin 20 ms:n luokkaa. Tämä vastaa reitittimellä tehtyjen testituloksien kanssa, jolla keskimääräinen aika käyttäjätason viiveelle oli noin 80–90 ms:n luokkaa. Kuvassa 11 on esitettyä keskimääräinen viiveen vaihtelu päivän aikana. Viive pysyi suhteellisen vakaana testijakson aikana. Mobiiliverkoille tyypillisiä piikkejä viiveessä esiintyi kohtuullisesti. Alla tuloksia laitteella suoritetuista Ping-testeistä. Alimmillaan viive oli vajaat 60 ms ja enimmillään noin 600 ms laitteen ja verkon välillä, keskiarvon ollessa 80 ms:n luokkaa. Pakettihäviötä esiintyi myös näissä testeissä vaihtelevasti.

--- 172.16.1.1 ping statistics ---

509 packets transmitted, 265 packets received, 47% packet loss
round-trip min/avg/max = 57.6/80.6/573.9 ms

--- 172.16.1.1 ping statistics ---

1002 packets transmitted, 963 packets received, 3 % packet loss
round-trip min/avg/max = 57.5/85.7/628.1 ms



Kuva 11. Keskimääräinen viiveen vaihtelu päivän aikana.

Viiveen osalta CDMA450-teknologia on kilpailukykyinen muiden 3G-teknologioiden kanssa kuten HSPA:n ja WCDMA:n kanssa. Uudemmat teknologiat pienentävät verkoviivettä merkittävästi, esimerkiksi 4G LTE pääsee käyttäjätason viiveen osalta käytännössä parhaimmillaan jopa 30 ms:n luokkaan.

6.5.2 Toinen testijakso

Pakettihäviön runsaan esiintymisen vuoksi reitittimen sijaintia siirrettiin ensimmäisen testijakson jälkeen pois keskusta-alueelta Oslon esikaupunkialueelle Haganiin. Haganiissa suoritettu lyhyt vertaustesti osoitti pakettihäviön pienentyneen merkittävästi alle 5 %:n lukemiin verrattuna testijaksoon Oslon keskusta-alueella. Lyhyestä vertaustestistä ei kuitenkaan saatu tarkempaa dataa vertailuksi.

6.5.3 Testauksen päätelmiä

Koska testilaitteiden määrä oli pieni ja testaus rajoittunut, otanta ei anna juuri tarkempaa tietoa kuin olosuhteista testatuissa sijainneissa. Kuitenkin nämä tulokset antavat viitteen siitä, että CDMA450-verkko olisi parhaimmillaan harvaan asutetuilla alueilla tai että testausolosuhteet Oslon keskusta-alueella olivat poikkeuksellisen ruuhkaiset. 450 MHz:n CDMA-verkko kuitenkin osoittautui luotettavaksi yhteystekniikaksi antaen suhteellisen pieniviiveisen yhteyden verkkoon verrattuna vastaaviin 3G-verkkoihin.

Tarkempia päätelmiä varten olisi syytä olla useampi testilaitte käytössä ja suorittaa testaukset useammassa eri paikassa, jotta virhelähteet saataisiin minimoitua. Jos 450

MHz:n verkko mahdollisesti avautuu tulevaisuudessa uudelleen Suomessa, tulisi suorittaa tarkemmat testit useammalla laitteella, esim. ajoneuvoissa rinnakkain UMTS-verkon kanssa, jotta saataisiin käytännöllisiä tuloksia verkon soveltuvuudesta liikkuvaan M2M-käyttöön.

7 Tulevaisuuden näkymät

Tulevaisuus Suomessa @450-verkolla näyttää tällä hetkellä olevan vielä epävarma, sillä kiinnostus julkisuudessa kyseistä verkkoa kohtaan on ollut pientä Datame Oy:n konkurssin jälkeen. Kilpailukyky CDMA-tekniikalla muita mobiiliverkkoja kohtaan on heikentynyt vuosien mittaan ja heikentyy edelleen 800 MHz:n LTE-verkon nopeasti kasvavan peittoalueen myötä. Aikaisemmin @450-verkolla merkittävin etu on ollut juuri laajassa peittoalueessa ja toimivuus paikoissa, joissa muita laajakaistapalveluita ei ollut tarjolla.

CDMA450/2000-teknologian osalta tulevaisuus muualla maailmalla on vakiintunut varsin kinkin M2M-markkinoilla. CDMA2000 tulee todennäköisesti säilyttämään merkittävän markkinaosuutensa M2M-markkinoiden kehittyessä ja kasvaessa globaalisti. Panostus tekniikan M2M-soveltuvuuteen näkyy muunmuassa uudessa Rev. F päivityksessä.

450 MHz:n LTE

3GPP-yhteistyöorganisaatio aloitti 450 MHz:n taajuusalueen standardisoinnin myös LTE-verkoille ja sai sen valmiiksi jo vuoden 2013 aikana. Aikaisemmin tälle taajuusalueelle on standardoitu vain CDMA-tekniikka. Kyseiselle LTE-teknologialle 450 MHz:n taajuusalueelle on ollut kiinnostusta Brasiliassa, jonne kyseistä verkkoa on suunniteltu rakennettavaksi jo vuoden 2014 aikana 2600 MHz:n LTE-verkon rinnalle. 450 MHz:n LTE-verkko tarjoaisi korkeat tiedonsiirtonopeudet, jopa 25 Mbit/s alalinkille ja 12,5 Mbit/s ylälinkille, pienen viiveen sekä laajan peittoalueen. Suomessa taajuusalueen ruuhkaisuuden takia yhteysnopeus jää hieman muista LTE-verkoista kapeamman taajuusalueen takia, mikäli muutoksia taajuusalueeseen ei tehdä. 450 MHz:n taajuusalueen tuki LTE-verkoille tulee tarjolle osana 3GPP:n julkaisemassa LTE Release 12 - määrittelyissä taajuuskaistana 31 (Band 31). [25,30.]

Suomessa kyseisen 450 MHz:n taajuusalueen käytön tulevaisuus ei vielä ole julkisuudessa ollut laajasti esillä. Suuret operaattorit keskittyvät todennäköisesti nykyisten 800

MHz:n LTE-verkkojen käyttöönottoon lähiaikoina. Pienempi operaattori voisi pyrkiä markkinoille pelkällä 450 MHz:n LTE-verkolla. LTE-verkon käyttöönotto 450 MHz:n taajuusalueelle vaatisi nykyisten tukiasemien päivityksen. Taajuusluvan uusi omistaja jatkaa todennäköisesti verkon ylläpitämistä CDMA450-tekniikalla päivittäen sen vähitellen LTE-tekniikaksi. LTE450-verkkoa tukevia päätelaitteita ei kuitenkaan ole vielä saatavilla juuri lainkaan, joten siirtymävaihe kestää vielä tovin.

450 MHz:n taajuusalueen yksi tulevaisuus voisi olla myös yksityisenä radioverkkona. Monet M2M-sovellukset hyötyisivät yksityisestä mobiiliverkosta julkisen jaetun mobiiliverkon sijaan. CDMA Development Groupin konseptin mukaan tulevaisuudessa lisääntyvät etäluettavat mittarit (Smart Meters), julkiset valaisimet, latausasemat tai muut toiminnot älykkäässä sähköverkossa (Smart Grid) ovat usein M2M-sovelluksia, jotka tarvitsevat luotettavan radioverkon toimiakseen varmasti. Yksityinen 450 MHz:n CDMA-verkko voisi olla yksi sopiva kustannustehokas vaihtoehto. [27.]

8 Johtopäätöksiä

Suomen ainoan CDMA450-verkko-operaattorin konkurssin myötä ei ole syytä jatkotarkasteluille CDMA450-tekniikan ja laitteiden suhteen lähiaikoina. CDMA2000-tekniikan elinikä kehittyneillä markkinoilla, kuten Suomessa, alkaa olla kuluttajamarkkinoilla loppupuolella. On todennäköistä, että CDMA450-verkko ei ole Suomessa enää julkisesti toiminnassa pitkään. @450-mobiiliverkon toimiluvan tekniikkaa ei ole määritelty tietyksi aikaisemmin tapahtuneen verkkotekniikan päivityksen takia, jolloin Datame Oy pyysi toimilupaan muutosta. Täten pidän todennäköisempänä, että mikäli 450 MHz:n taajuudelle tulee julkiseen käyttöön tarkoitettu mobiiliverkko, on sen teknologia jokin muu kuin CDMA450, esimerkiksi LTE. Kuitenkin on syytä huomioida 450 MHz:n taajuusalueen suhteellisen kapean taajuusalueen rajoittavan Suomessa mahdollisen mobiiliverkon nopeutta hieman kilpailijoihin nähden, mikäli taajuusalueessa ei tapahdu muutoksia.

Itse tekniikka ja taajuusalue laajoine peittoalueineen kuitenkin osoittautuivat ominaisuuksiltaan suhteellisen sopivaksi moneen tarkoitukseen M2M-ympäristöissä. Kuten etukäteen arvioitu, @450-verkon etu on lähinnä taajuusalueesta johtuen kuuluvuus harvaan asutetuilla alueilla ja maastossa. Verkon peittoalue onkin kattavampi verrattuna muihin suurimpiin 3G-operaattoreihin, joten se tarjoaisi sopivia yhteyksiä esimerkiksi metsäteollisuuden ajoneuvojen käyttöön. CDMA450-tekniikka puolestaan tarjoaa luo-

tettavan, tietoturvallisen, pieniviiveisen ja kustannustehokkaan yhteyden, mikä tekee siitä M2M-käyttöön hyvin soveltuvan vaihtoehdon globaalisti.

Jatkossa on syytä seurata 450 MHz:n taajuusalueen tulevaisuutta, siitä mihin käyttö-tarkoitukseen se tulevaisuudessa päättyy. 800 MHz:n taajuusalueen LTE:n rinnalla 450 MHz:n LTE-verkko voisi tarjota laajat peittoalueet liikkuvien M2M-sovelluksien käyttöön tulevaisuudessa 2G- ja 3G-teknologioiden korvaajina. LTE450-verkon toiminnan käynnistyttyä voidaan suunnitella testausta verkon soveltuvuudesta liikkuvaan M2M-käyttöön.

Lähteet

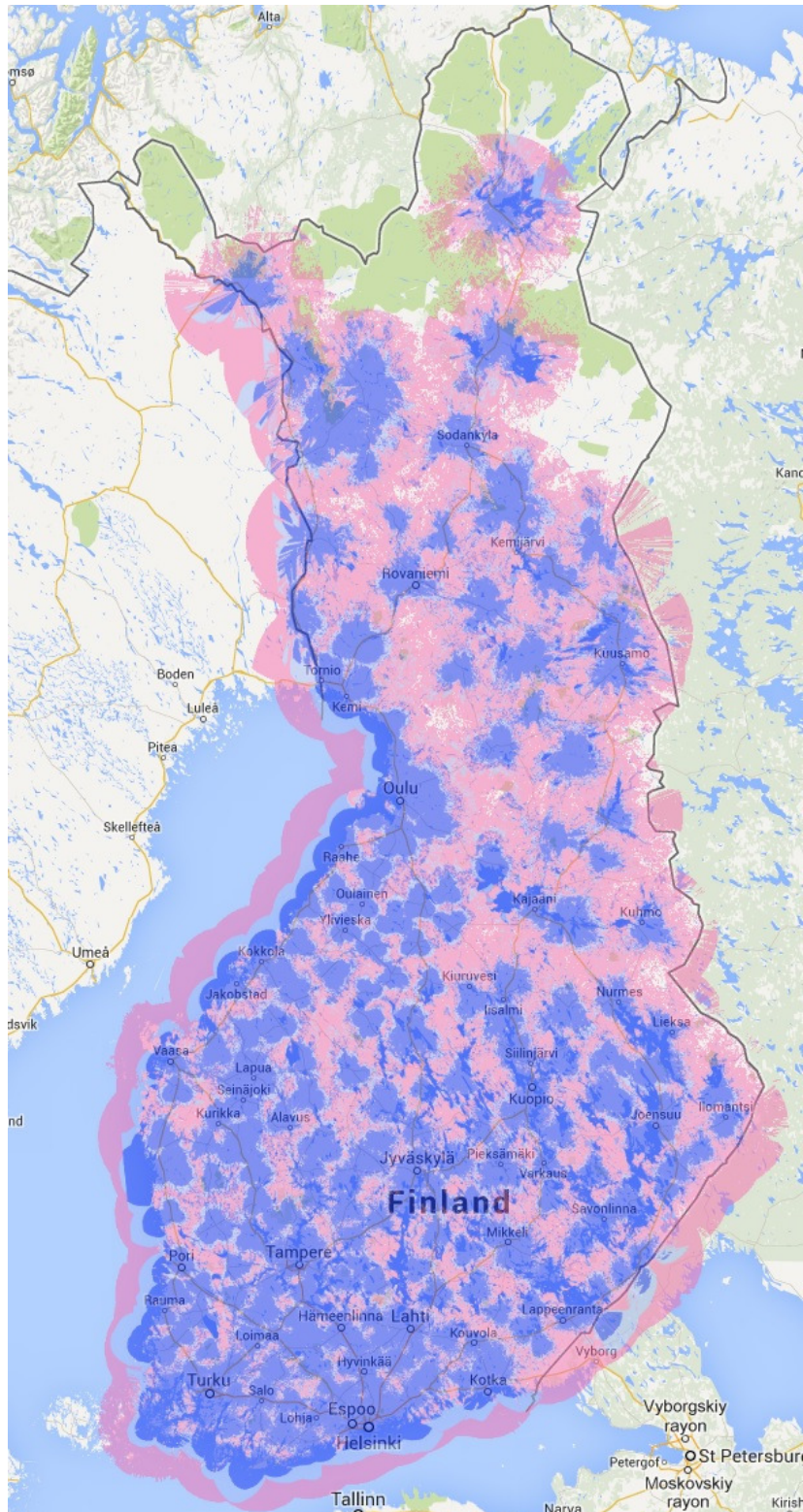
- 1 Digita ja Datame ovat sopineet @450 -laajakaistaliiketoiminnan jatkosta. 2010. Verkkodokumentti. Digita Oy.
http://www.digita.fi/yhtio/media/tiedotteet/2010?422_m=512. Päivitetty 22.12.2010. Viitattu 21.11.2013.
- 2 Anttalainen, Tarmo. 2003. Introduction to Telecommunications Network Engineering. Norwood, MA: Artech House.
- 3 CDMA Network Structure. 2012. Verkkodokumentti.
<https://sites.google.com/site/the4gtelecom/cdma-network-structure>. Päivitetty 09/2012. Viitattu 24.11.2013.
- 4 History of mobile phones. 2013. Verkkodokumentti.
http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_mobile_phones. Viitattu 24.11.2013
- 5 Understanding HSPA+ Cellular Technology. 2012. Vekkodokumentti. Penton Media Inc. <http://electronicdesign.com/communications/understanding-hspa-cellular-technology>. Päivitetty 6/2012. Viitattu 26.11.2013
- 6 1x EV-DO Release 0. 2013. Verkkodokumentti. CDG.
<http://www.cdg.org/technology/1xevdorel0.asp>. Viitattu 26.11.2013.
- 7 Cdma2000 Tehnology Family. 2013. Verkkodokumentti. Eogogics.
<http://www.eogogics.com/talkgogics/infocenter/cdma2000>. Viitattu 26.11.2013
- 8 Penttinen, Jyrki. 2006 Tietoliikennetekniikka, 3G ja erityisverkot. WSOY
- 9 Holma and Toskala. 2005. WCDMA for UMTS, Radio Acces For Third Generation Mobile Communications. Third Edition. West Sussex, England: WILEY
- 10 IS-95, cdmaOne. Verkkodokumentti. Adrio Communications Ltd.
<http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/3gpp2/is95-cdmaone.php>. Viitattu 2.12.2013.
- 11 MIMO. 2006. Verkkodokumentti. WhatIs.com.
<http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/MIMO>. Päivitetty 11/2006. Viitattu 2.12.2013.
- 12 Qualcomm Abandons UMB, Future of CDMA Ended. 2008. Verkkodokumentti. C114. <http://www.cn-c114.net/583/a361645.html>. Päivitetty 14.11.2008. Viitattu 2.12.2013.
- 13 CDMA statistics. Verkkodokumentti. 2013. CDG.
http://www.cdg.org/resources/cdma_stats.asp. Päivitetty 11/2013. Viitattu 2.12.2013.
- 14 Cdma450. 2013. Verkkodokumentti. CDG.
<http://www.cdg.org/technology/cdma450.asp>. Viitattu 2.12.2013.

- 15 Spread spectrum. Verkkodokumentti. 2013. Wikipedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/Spread_spectrum. Viitattu 7.12.2013.
- 16 Kiuru: Lainsäädäntö valmisteltava 700 MHz:n alueen laajakaistakäyttöön. 2013. Verkkodokumentti. Liikenne- ja Viestintäministeriö.
<http://www.lvm.fi/tiedote/4138043/kiuru-lainsaadanto-valmisteltava-700-mhz-n-alueen-laajakaistakayttoon>. Päivitetty 24.01.2013. Viitattu 7.12.2013
- 17 Taajuushuutokaupan 4G-taajuudet kolmelle toimijalle. Verkkodokumentti. Liikenne- ja Viestintäministeriö. <http://www.lvm.fi/tiedote/4351806/taajuushuutokaupan-4g-taajuudet-kolmelle-toimijalle>. Päivitetty 30.10.2013. Viitattu 7.12.2013.
- 18 CDMA 2000 and CDMA 450. 2003. Verkkodokumentti. ITU.
http://www.itu.int/ITU-D/tech/events/2003/slovenia2003/Presentations/Day%203/3.3.1_Chandler.pdf. Viitattu 12.12.2013.
- 19 Potential of CDMA450 for Rural Network Connectivity. 2007. UC Berkley. Verkkodokumentti. <http://tier.cs.berkeley.edu/docs/wireless/cdma450.pdf>. Viitattu 12.12.2013.
- 20 Commonalities-between-cdma2000-and-wcdma-technologies. 2006. Verkkodokumentti. Qualcomm.
<http://www.qualcomm.com/media/documents/files/commonalities-between-cdma2000-and-wcdma-technologies.pdf>. Päivitetty 10/2006. Viitattu 12.12.2013.
- 21 Challenges in Realizing Mobile M2M Global Services. 2012. Verkkodokumentti. Connected Device Forum.
https://www.cdg.org/resources/files/white_papers/CDF_Roaming_Paper_July2012.pdf. Päivitetty 06/2012. Viitattu 12.12.2013.
- 22 The Plausibility of implementing Receive Antenna Diversity in the Downlink of CDMA450 system. 2010. Verkkodokumentti. <http://hig.diva-portal.org/smash/get/diva2:310564/FULLTEXT01.pdf>. Viitattu 12.12.2014.
- 23 Martin Sauter. 3G, 4G and Beyond: Bringing Networks, Devices and the Web Together". Feb 2013. WILEY
- 24 Types of Power Control in CDMA. 2012 Verkkodokumentti.
<http://www.teletopix.org/cdma/types-of-power-control-in-cdma/>. Päivitetty 26.5.2012. Viitattu 2.1.2014.
- 25 Analyst Angle: 3GPP standardization of LTE in 450 MHz is good news for Brazilian operators. Verkkodokumentti. 2013.
<http://www.rcrwireless.com/americas/20130724/analyst-angle/analyst-angle-3gpp-standardization-lte-450-mhz-good-news-brazilian-operators/>. Päivitetty 24.6.2013. Viitattu 2.1.2014.
- 26 CDMA NETwork Technologies: A Decade of Advances and Challenges. 2013. Verkkodokumentti. Tektronix, Inc.
http://www.cse.unt.edu/~rdantu/FALL_2013_WIRELESS_NETWORKS/Data_CDMA.pdf. Viitattu 7.2.2014.

- 27 The 450 MHz Band for Smart Grid and Smart Metering. Verkkodokumentti. 2013. CDG.
https://www.cdg.org/resources/files/white_papers/CDG450SIG_450MHz_Band_Smart_Grid_Smart_Metering_Concept-SEPT2013.pdf. Viitattu 7.2.2014
- 28 Smart Devices & Services, How CDMA Technology is Driving The Connected Age. 2013. Verkkodokumentti.,
http://www.cdg.org/resources/files/white_papers/HRI_CDG_Smart%20Services_May%202013.pdf. Viitattu 7.2.2014.
- 29 Holma H. and Toskala A. WCDMA for UMTS, HSPA Evolution And LTE. 2008 WILEY
- 30 LTE 450 MHz technology for broadband services in rural and remote areas. Verkkodokumentti. <https://itunews.itu.int/en/4618-LTE-450MHz-technology-for-broadband-services-in-rural-and-remote-areas-BR-Case-study-of-Brazil.note.aspx>. Viitattu. 27.3.2014
- 31 Prabhat Man Sainju, LTE Performance Analysis on 800 And 1800 MHz Bands, Tampere University of Technology. 2012. Verkkodokumentti.
<http://dsp.space.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21173/sainju.pdf?sequence=1>. Viitattu 27.3.2014.
- 32 Wireless Technologies for the 450MHz band. 2013. Verkkodokumentti. CDG.
https://www.cdg.org/resources/files/white_papers/CDG450SIG_Wireless_Technologies_for_the_450MHz_band-SEPT2013.pdf. Viitattu 27.3.2014.
- 33 List of LTE networks. 2013. Wikipedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_LTE_network. Viitattu 27.3.2013
- 34 Datame @450 liittymät. 2013. Verkkodokumentti.
https://www.datame.fi/imgs/sopimukset_ja_ehdot/Datame_@450_Palvelukohteiset_ehdot_yritykset_CDMA_2013-08-26.pdf. Viitattu 6.4.2013
- 35 Low versus High Radio Spectrum. Verkkodokumentti. 5.3.2012.
<http://www.hightechforum.org/low-versus-high-radio-spectrum/>. Viitattu 25.4.
- 36 4G+IPv6. Verkkodokumentti. 9.5.2014. Elektroniikkalehti.
http://etn.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=1331:4g-ipv6-alykkaasti-keskustelevia-koneita&catid=26&Itemid=140. Viitattu 10.5.2014.

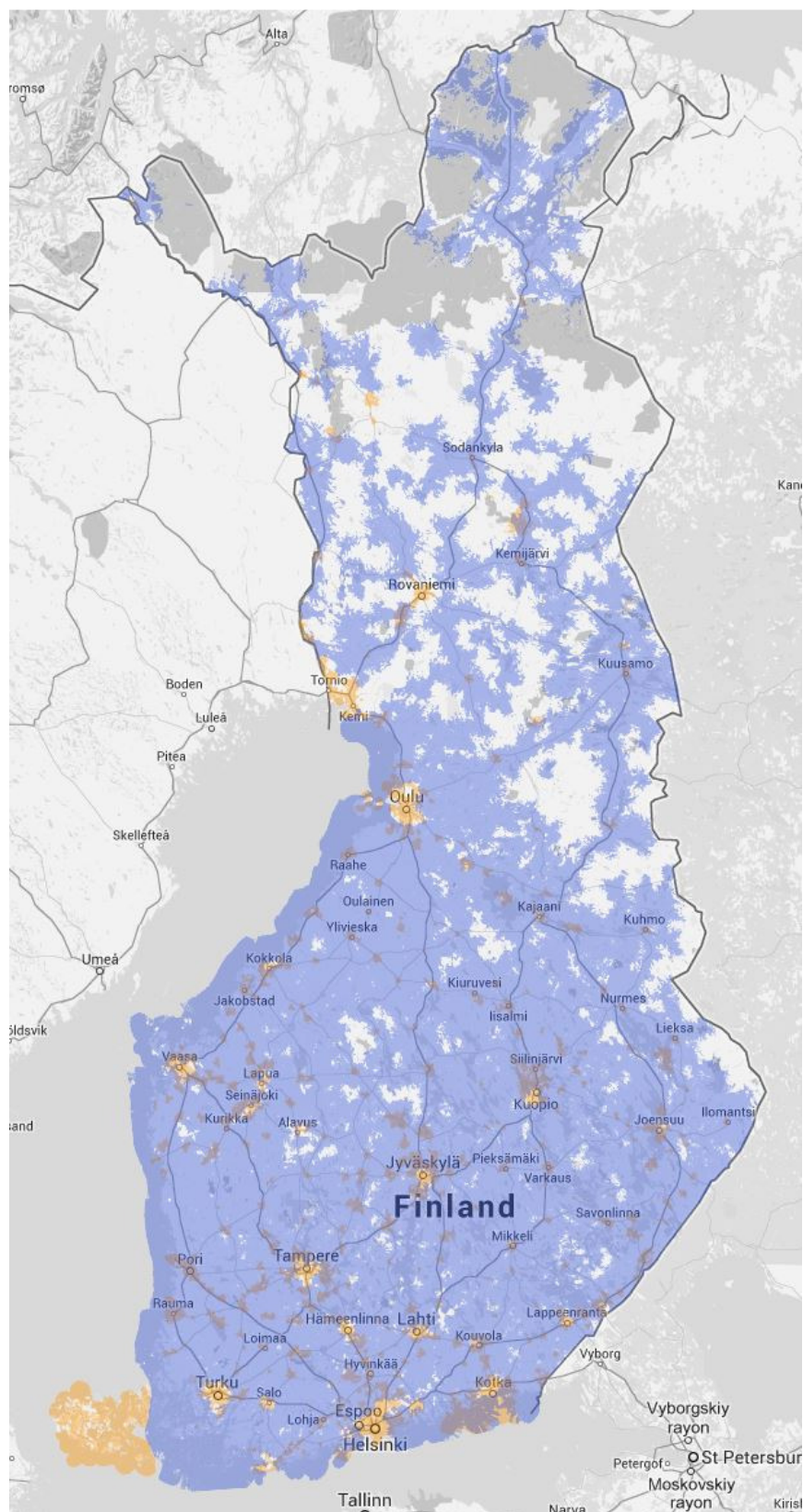
Kuuluvuuskartat

Datame Oy:n @450-verkon kuuluvuusalue:



Jossa tummansinisellä merkitty alue sisäpeitto, vaaleansinisellä ulkopeitto ja pinkillä merkitty lisäantennipeitto.

Elisa Oyj:n UMTS-verkon kuuluvuusalue:



Jossa sinisellä merkitty UMTS 900 kuuluvuusalue ja keltaisella UMTS 2100 kuuluvuusalue.

LTE Downlink Link Budget

Parameters	Unit	LTE 800 DL	LTE 1800 DL
Boltzmann Constant		1.38E-23	1.38E-23
Room Temperature	Kelvin	2.90E+02	2.90E+02
Base Station Height	meters	81.00	77.00
Mobile Station Height	meters	1.50	1.50
Carrier Frequency	MHz	800	1800
Bandwidth	Hz	1.00E+07	1.00E+07
Number of Resource Blocks		50.00	50.00
Number of Sub-carriers per Resource Block		12	12
Bandwidth per Sub-carrier	Hz	1.50E+04	1.50E+04
Effective Bandwidth	Hz	9.00E+06	9.00E+06
Time Period per resource block	s	5.00E-04	5.00E-04
Total Number of Sub-carriers		600	600
Transmitter Power	dBm	46	46
Antenna Gain (From manufacturer's specifications)	dBi	17.1	17.8
Cable Losses	dB	0.25	0.34
Antenna Diversity Gain	dB	0	0
Body Loss	dB	0	0
EIRP	dBm	62.85	63.46
Thermal Noise Density	dBm/Hz	-2.04E+02	-2.04E+02
Total Thermal Noise of the system	dBm	-104.43	-104.43
Receiver Antenna Gain	dB	0	0
Receiver Noise Figure	dB	7	7
Receiver Losses	dB	0	0
Modulation Scheme		QPSK	QPSK
No of Bits per Symbol		2	2
Coding Rate		0.1	0.1
Useful Bits per Symbol		0.2	0.2
No. Of Bits per Resource Block		16.80	16.80
Spectral Efficiency	bps/Hz	1.68E-01	1.68E-01
Required SINR at the Cell Edge	dB	-9.08	-9.08
Receiver Sensitivity	dBm	-106.52	-106.52
Fading Margin	dB	0	0
Interference Margin	dB	4	4
Coverage Probability	%	95	95
Indoor Path Loss	dB	0	0
Control Channel Overhead (29%)	dB	-0.53	-0.53
Total Path Loss	dB	165.9	166.5
Cell Radius (Okumura Hata Model)	Km	29.3	12.7